

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

Filière : électrotechnique

Spécialité : Commande électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Thème

**Dimensionnement et simulation d'un hacheur
dédié aux systèmes photovoltaïques**

Réaliser par :

- **MEHIDI Belkacem**
- **SAGHI Mohamed**

Dirigé par :

- **AISSOU Said (Encadreur)**
- **AMIROUCHE Elyazid (Co-Encadreur)**

Année universitaire : 2022/2023

The header features a central illustration of a rolled-up white diploma tied with a red ribbon, positioned next to a black graduation cap with a gold tassel. Several other graduation caps are scattered around the scene, some appearing to be in motion as if tossed. The entire composition is set against a white background and enclosed within a thin black rectangular border.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le souffle de vie, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et c'est grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont soutenu tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs et sincères remerciements à notre encadreur Mr AISSOU Said et notre co-encadreur AMIROUCHE Elyazid, vous nous avez bien guidé dans ce travail de recherche, nous donnant inlassablement beaucoup de votre temps, votre enthousiasme à partager vos connaissances tout comme votre sens chaleureux du contact nous aura beaucoup marqué.

Soyez assuré de notre plus sincère gratitude et de notre profond respect.

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre profonde et respectueuse gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, qui m'ont beaucoup soutenue et qu'ils ont sacrifié pour mon bien, et qui m'ont encouragé et soutenu le long de ma vie et durant mon cursus.

Il m'est agréable de dédie ce modeste travaille à Mes frères, Mounir et Wahib.

À ma belle-sœur Lydia.

À mes chers grands parents.

À tous mes oncles et tantes.

À tous mes cousins.

À tous mes amis.

Belkacem



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

Saghi Allaoua et Ksentini Malika

A mes chers frères

Nadjim, Nassim, Sofiane, Fayçal

A mes chères sœurs

Sabrina, Soraya, Zina

A mes chers amis

Qui ont été toujours à mes côtés et ils n'ont jamais cessé de m'encourager et de m'entourer de toute leurs affections et leurs amours

Mohamed



Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I. Généralités sur les énergies renouvelables	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les énergies renouvelables	3
I.2.a. Énergie du vent	3
I.2.a.a. Taille des éoliennes	5
I.2.a.b. Production de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent	5
I.2.a.c. Potentiel du vent en Algérie	6
I.2.a.d. Avantages et inconvénients de l'énergie du vent	6
I.2.b. Énergie hydraulique	6
I.2.b.a. Production de l'énergie électrique à partir de l'énergie hydraulique	6
I.2.b.b. Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique	7
I.2.c. La biomasse	7
I.2.c.a. Production de l'énergie électrique à partir de la biomasse.....	9
I.2.c.b. Avantages et inconvénients de la biomasse.....	9
I.2.d. La géothermie	10
I.2.d.a. Production de l'énergie électrique à partir de la géothermie	11
I.2.d.b. Avantages et inconvénients de la géothermie	11
I.2.e. L'énergie solaire	12
I.2.e.a. L'énergie solaire dans le monde	12
I.2.e.b. Potentiel solaire en Algérie	12
I.2.f. Exploitation de l'énergie solaire	13
I.2.f.a. L'énergie solaire thermique	13
I.2.f.b. L'énergie solaire photovoltaïque.....	15
I.3. Étude des systèmes photovoltaïques	16
I.3.a. La cellule photovoltaïque	16
I.3.a.a. L'effet photovoltaïque.....	16

Sommaire

I.3.a.b. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	16
I.3.a.c. Différentes structure des cellules photovoltaïques.....	17
I.3.a.d. Modèle et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	18
I.3.a.e. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque	20
I.3.a.f. Influence de l'ensoleillement et de la température	23
I.3.b. Association des cellules photovoltaïques (module photovoltaïque).....	26
I.3.b.a. Association des cellules photovoltaïques en série	26
I.3.b.b. Association des cellules photovoltaïques en parallèle	28
I.3.c. Le système photovoltaïque	29
I.3.c.a. Le panneau photovoltaïque.....	30
I.3.c.b. Batterie solaire	30
I.3.c.c. Le régulateur (contrôleur de charge)	30
I.3.c.d. Le convertisseur d'énergie (onduleur)	31
I.3.c.e. La charge	31
I.3.d. Différents systèmes photovoltaïques	31
I.3.d.a. Systèmes autonomes	31
I.3.d.b. Systèmes hybrides	32
I.3.d.c. Systèmes connectés au réseau	33
I.3.e. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	34
I.3.e.a. Avantages	34
I.3.e.b. Inconvénients.....	34
I.4. Intégration des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques	34
I.5. Conclusion	35
Chapitre II. Les convertisseurs DC-DC	37
II.1. Introduction.....	37
II.2. Hacheurs	37
II.3. Convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques	38

Sommaire

II.3.a. Types des convertisseurs DC-DC	39
II.3.a.a. Isolés de la source	39
II.3.a.b. Non isolés de la source	39
II.3.b. Hacheur élévateur (Boost).....	41
II.3.b.a. Principe de fonctionnement	42
II.3.c. Puissance des convertisseurs	47
II.3.c.a. Définition.....	47
II.3.c.b. Puissance instantanée.....	48
II.3.c.c. Puissance active	48
II.3.c.d. Puissance apparente	48
II.3.c.e. Facteur de puissance	48
II.4. Connexion directe source-charge.....	48
II.4.a. Schéma synoptique du système PV adapté	49
II.4.b. Structure du système PV avec l'adaptation du convertisseur Boost	50
II.5. Commande MPPT des convertisseurs DC-DC	50
II.5.a. Principe de la commande MPPT	51
II.5.b. Classification des commandes MPPT.....	52
II.5.b.a. Classification des commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée	52
II.5.b.b. Classification des commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie.....	52
II.5.b.c. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche.....	52
II.5.c. Les algorithmes MPPT	53
II.5.c.a. Méthode perturbation et observation (P&O).....	53
II.5.c.b. Méthode incrémentation des conductances (IncCond).....	55
II.5.c.c. Méthode de la logique floue	57
II.6. Conclusion.....	58

Sommaire

Chapitre III. Dimensionnement et simulation du hacheur Boost	60
III.1. Introduction	60
III.2. Module photovoltaïque	60
III.2.a. Connexion en série	60
III.2.b. Connexion en parallèle	61
III.2.c. Caractéristiques du panneau solaire utilisé	61
III.2.d. Dimensionnement et simulation des panneaux photovoltaïques	61
III.3. Dimensionnement des composants L et C du hacheur Boost	64
III.3.a. Le choix des composant.....	65
III.3.b. Calcul de nombre de tours	66
III.4. Modalisation et simulation du convertisseur boost.....	67
III.4.a. Schéma du hacheur boost.....	67
III.4.b. Commande MPPT	68
III.5. Simulation du module photovoltaïque avec le hacheur boost.....	69
III.5.a. Cas des conditions STC (Standard Test Conditions).....	70
III.5.b. Cas des conditions variables	71
III.6. Interprétation des résultats	72
III.7. Conclusion.....	72
Conclusion générale	74
Références bibliographiques.....	74

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : Éoliennes à axe horizontal installées sur terre	4
Figure I.2 : Éoliennes à axe horizontal installées sur mer.....	5
Figure I.3 : Fonctionnement d'une centrale hydraulique	7
Figure I.4 : Fonctionnement d'une centrale biomasse	9
Figure I.5 : Fonctionnement d'une centrale géothermique	11
Figure I.6 : Carte d'éclairement solaire en Algérie	13
Figure I.7 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.....	14
Figure I.8 : Schéma d'une cellule PV	17
Figure I.9 : Types de cellules PV au silicium.....	18
Figure I.10 : Circuit équivalent d'une cellule PV.....	19
Figure I.11 : Caractéristique puissance-tension pour une cellule PV	21
Figure I.12 : Caractéristique courant-tension pour une cellule PV	22
Figure I.13 : Caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	24
Figure I.14 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.	24
Figure I.15 : Caractéristique $P=f(V)$ d'un GPV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	25
Figure I.16 : Courbes $I=f(V)$ d'un GPV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	25
Figure I.17 : Composants d'un champ de module PV	26
Figure I.18 : Schéma d'une association de 3 cellules PV en série	26
Figure I.19 : Caractéristique $P=f(V)$ des cellules PV raccordées en série	27
Figure I.20 : Caractéristique $I=f(V)$ des cellules PV raccordées en série	27
Figure I.21 : Schéma d'une association de 3 cellules PV en parallèle	28
Figure I.22 : Caractéristique $P=f(V)$ des cellules PV raccordées en parallèle	28
Figure I.23 : Caractéristique $I=f(V)$ des cellules PV raccordées en parallèle	29
Figure I.24 : Les composants d'un système PV	29
Figure I.25 : Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie	32
Figure I.26 : Système hybride (photovoltaïque-éolienne).....	32
Figure I.27 : Système PV directement relié au réseau	33
Figure I.28 : Système PV relié au réseau avec batterie.....	33

Chapitre II: Les convertisseurs DC-DC

Figure II.1 : Symbole du convertisseur continu-continu.....	38
Figure II.2 : Principe de base d'un convertisseur DC-DC	38

Liste des figures

Figure II.3 : Schéma électrique du convertisseur DC-DC Flyback	39
Figure II.4 : Schéma du convertisseur DC-DC Boost.....	39
Figure II.5 : Schéma du convertisseur DC-DC Buck	40
Figure II.6 : Schéma du convertisseur DC-DC Buck-Boost	40
Figure II.7 : Évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs	41
Figure II.8 : Phase d'accumulation de l'énergie.....	42
Figure II.9 : Phase de roue libre	43
Figure II.10 : Formes d'ondes (courant, tension, état d'interrupteur) du convertisseur Boost en mode conduction continue	43
Figure II.11 : Formes d'ondes (courant, tension, état d'interrupteur) du convertisseur Boost en mode conduction discontinue	45
Figure II.12 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost	47
Figure II.13 : Couplage du convertisseur avec un récepteur.....	47
Figure II.14 : Connexion directe GPV-charge DC par le biais d'une diode anti-retour.	49
Figure II.15 : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur).....	49
Figure II.16 : Système PV formé par un générateur PV, convertisseur DC-DC élévateur et la charge résistive	50
Figure II.17 : Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT	50
Figure II.18 : Principe de la commande MPPT	51
Figure II.19 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O	54
Figure II.20 : Algorithme de P&O classique.....	55
Figure II.21 : Algorithme de la méthode Incrément de conductance	56
Figure II.22 : Structure de base de la commande floue	57

Chapitre III: Dimensionnement et simulation du hacheur Boost

Figure III.1 : Schéma synoptique de conversion d'énergie photovoltaïque avec une commande MPPT.	60
Figure III.2 : Schéma bloc du module photovoltaïque.	62
Figure III.3 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension	62
Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension	63
Figure III.5 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension.....	63
Figure III.6 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension	63

Liste des figures

Figure III.7 : Logiciel utilisé pour calculer la longueur et nombre de spire pour notre bobine.....	66
Figure III.8 : Schéma bloc du hacheur Boost.....	67
Figure III.9 : Signal de commande PWM	67
Figure III.10 : Allure de tension et du courant pour $\alpha=0.5$	68
Figure III.11 : Allure de tension et du courant pour $\alpha=0.87$	68
Figure III.12 : Algorithme de la méthode de conduction incrémentale P&O	69
Figure III.13 : Schéma bloc de simulation photovoltaïque	69
Figure III.14 : Allures des différents signaux d'entrée et de sortie du hacheur	70
Figure III.15 : Allures des différents signaux d'entrée et de sortie du hacheur	70
Figure III.16 : Les principaux signaux de puissance pour une perturbation d'ensoleillement.....	71
Figure III.17 : Les principaux signaux de puissance pour une perturbation de température.	72

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Tableau I.1 : Taille des éoliennes 5
Tableau I.2 : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire en 2018 12
Tableau I.3 : répartition du potentiel solaire en Algérie 13

Chapitre II: Les convertisseurs DC-DC

Tableau II.1 : Principe de l'algorithme P&O 54
Tableau II.2 : Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue 58

Chapitre III: Dimensionnement et simulation du hacheur Boost

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque 61
Tableau III.2 : Valeurs critiques minimales calculées et normalisées des composants du hacheur 65
Tableau III.3 : Les variations de tension et courant pour différente valeur de α 71



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est essentielle pour le développement actuel du monde. L'homme, les machines et la nature en dépendent tous, ce qui fait de la production d'énergie un défi majeur pour le présent et l'avenir. La demande mondiale en énergie augmente en proportion de la croissance démographique, de la disponibilité limitée des sources d'énergie et des coûts sociaux et environnementaux liés à son approvisionnement. De plus, les pays en développement auront de plus en plus besoin d'énergie, en particulier d'électricité, qui joue un rôle essentiel dans leur développement et l'évolution des sociétés humaines. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable en raison de sa flexibilité d'utilisation et de sa pertinence dans de nombreux domaines d'activité. Les méthodes de production et les moyens de distribution associés connaîtront donc des changements significatifs au cours des prochaines décennies. [1]

Cependant, de nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. Cela entraîne des émissions de gaz à effet de serre et une augmentation de la pollution. De plus, la filière nucléaire pose des problèmes croissants, notamment en ce qui concerne le stockage des déchets nucléaires à long terme. Une autre préoccupation majeure est la consommation excessive des ressources naturelles, ce qui réduit dangereusement les réserves d'énergie pour les générations futures. Par exemple, l'industrie pétrolière et les transports, qui jouent un rôle essentiel dans notre société, dépendent fortement de l'énergie issue du pétrole. Cependant, les sources de pétrole deviennent de plus en plus rares, tandis que la demande énergétique mondiale continue de croître. Selon les estimations, les réserves mondiales pourraient être épuisées d'ici 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, ou au plus tard d'ici 2100 si des efforts sont déployés pour la production et la consommation énergétiques. [2]

L'énergie est une nécessité fondamentale pour l'humanité. Face aux prévisions inéluctables d'épuisement des ressources mondiales d'énergie fossile (telles que le pétrole, le gaz et le charbon), la science s'est tournée vers les énergies renouvelables, qui tirent leur source du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau et de la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont illimitées en termes de ressources. L'énergie solaire, en particulier grâce à la technologie photovoltaïque, est la principale source d'énergie renouvelable. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité, utilisable sous forme de courant continu. Bien que cette ressource soit de plus en plus reconnue comme une source d'énergie potentielle, elle a dû faire face à de nombreux préjugés. Par exemple, on lui a reproché d'être intermittente en raison des variations jour/nuit

Introduction générale

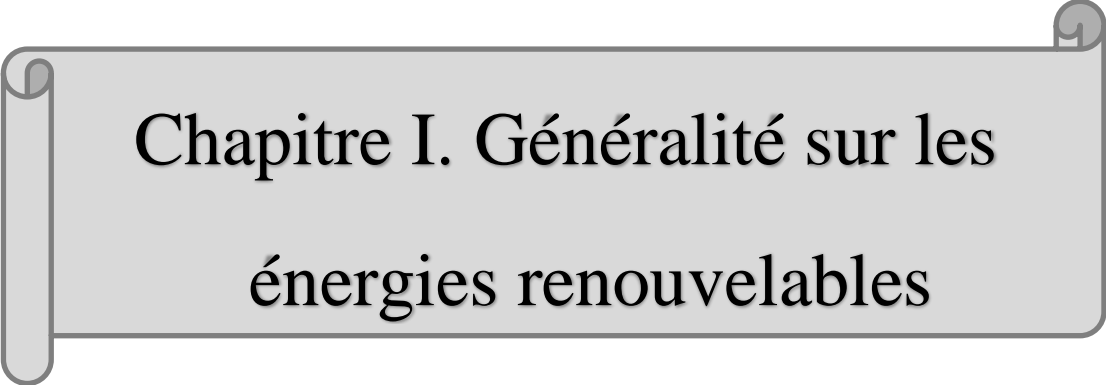
et saisonnières, d'être peu fiable et de nécessiter une dépense d'énergie supérieure à celle qu'elle peut produire pendant toute sa durée d'utilisation. Cependant, grâce aux progrès techniques réalisés dans les cellules photovoltaïques et le traitement de l'énergie, ces affirmations sont en train d'être réfutées. [3]

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle significatif dans la chaîne de conversion énergétique. Leur utilisation est répandue pour augmenter les tensions et les courants provenant des panneaux photovoltaïques, ainsi que dans les connexions aux batteries d'accumulateurs, aux éoliennes, aux systèmes hybrides, etc. Ces convertisseurs permettent d'ajuster la tension d'entrée d'un système en fonction de la tension de sortie souhaitée. [3]

Dans cette étude, nous nous pencherons sur la production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque.

- La première partie de cette étude présentera les généralités sur les énergies renouvelables. Nous expliquerons également les différentes techniques permettant de produire de l'électricité à partir de ces sources, en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs. Ensuite notre étude portera spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous décrirons et modéliserons les cellules photovoltaïques, en examinant les courbes des caractéristiques courant et puissance en fonction de la tension, de l'éclairement et de la température. Nous présenterons les équations caractéristiques correspondantes, les différents modes de regroupement des cellules photovoltaïques, ainsi que les composants constitutifs du système photovoltaïque.
- La deuxième partie de notre étude se concentrera sur les convertisseurs DC-DC et la modélisation du hacheur Boost utilisé dans les systèmes photovoltaïques, ainsi qu'une étude sur les puissances. Ensuite, nous présentons le principe de la recherche du point de puissance maximale « MPPT » avec quelques méthodes, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance, la méthode de perturbation et observation.
- La troisième partie sera consacrée à la simulation du hacheur Boost à l'aide du GPV (Générateur photovoltaïque).

Enfin, cette étude se conclura par une conclusion générale des résultats obtenus.



Chapitre I. Généralité sur les énergies renouvelables

Chapitre I. Généralités sur les énergies renouvelables**I.1. Introduction**

La production d'énergie électrique dans le monde repose principalement sur l'utilisation d'énergies fossiles et de combustibles nucléaires. Cependant, l'utilisation systématique de carburants fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, ainsi que de matières fissiles telles que l'uranium ou le plutonium, entraîne une émission importante de gaz polluants et de gaz à effet de serre. En effet, la production d'électricité à partir de combustibles fossiles est responsable de 40% des émissions mondiales de CO₂. [1]

Les énergies renouvelables offrent une solution alternative aux énergies fossiles, car elles présentent plusieurs avantages [2]:

- Elles sont moins perturbatrices pour l'environnement.
- Elles génèrent moins d'émission de gaz à effet de serre et de déchets.
- Elles sont renouvelables et inépuisables.
- Elles permettent une production décentralisée adaptée aux ressources et aux besoins locaux.
- Elles offrent une grande indépendance énergétique.

I.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement à un rythme suffisamment rapide pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. Elles sont générées par des phénomènes naturels cycliques ou constants. Le caractère renouvelable de ces sources dépend à la fois de leur taux de consommation et de leur vitesse de régénération. [4]

Les énergies renouvelables englobent différentes sources d'énergie telles que l'énergie éolienne produite par le vent, l'énergie solaire issue du soleil, l'énergie géothermique provenant de la chaleur de la Terre, l'énergie hydraulique générée par les chutes d'eau, l'énergie des marées résultant du mouvement des océans et enfin, l'énergie biomasse dérivée de la croissance des végétaux [5] :

I.2.a. Énergie du vent

L'énergie du vent est l'une des sources les plus importantes et prometteuses en termes de développement dans le monde entier. Contrairement aux sources d'énergie classiques, elle est

non polluante. Elle est générée par le mouvement de l'air qui est transformé en électricité par l'intermédiaire d'une génératrice. [6]

La force éolienne est utilisée depuis des milliers d'années, notamment dans les moulins à vent et la navigation. De nos jours, les éoliennes modernes sont équipées d'hélices spéciales capables de capter le vent et de le transformer en énergie électrique. Ces éoliennes sont installées sur terre et en mer, dans des zones où le vent souffle avec une vitesse élevée et constante. [7]

Il existe deux principales catégories d'éoliennes : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

- **Éolienne à axe vertical** : Ce type d'éolienne a fait l'objet de recherches approfondies, car elle a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales. De plus, son système mécanique (multiplicateur et génératrice) est situé au niveau du sol, ce qui facilite les interventions de maintenance. Cependant, certaines de ces éoliennes demandent une mise en marche initiale, tandis que le mât est généralement d'un poids considérable et soumis à des contraintes mécaniques importantes. [6]
- **Éolienne à axe horizontal** : Actuellement, la technologie la plus couramment employée pour collecter l'énergie éolienne repose sur des éoliennes à axe horizontal, car elles sont efficaces malgré leur petite taille (elles se composent de plusieurs pales profilées selon des principes aérodynamiques similaires à ceux des ailes d'avion). Les éoliennes de ce type ont supplanté les éoliennes à axe vertical en raison de leur coût plus abordable. [6]

Les figures I.1 et I.2 représentent des éoliennes à axe horizontal installées sur mer et sur terre.



Figure I.1 : Éoliennes à axe horizontal installées sur terre [6]



Figure I.2 : Éoliennes à axe horizontal installées sur mer [6]

I.2.a.a. Taille des éoliennes

Les besoins croissants en énergie électrique poussent les chercheurs et les constructeurs à concevoir des éoliennes de plus en plus puissantes, la puissance de l'éolienne étant directement proportionnelle à la longueur de ses pales. Les éoliennes peuvent être classées en trois catégories en fonction de leur taille : petites, moyennes et grandes. [8]

Le tableau (I.1) montre la taille des éoliennes.

Taille	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40 KW à 1 MW
Grande	45m et plus	1 MW et plus

Tableau I.1 : Taille des éoliennes [9]

I.2.a.b. Production de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent

Pour produire de l'électricité, il est nécessaire que le vent atteigne une vitesse spécifique permettant le démarrage du rotor. Ce seuil est généralement de 4 m/s. Le rotor entraîne alors le mouvement de l'arbre, qui est relié à l'alternateur, transformant ainsi l'énergie mécanique en énergie électrique. À mesure que la vitesse du vent augmente, la génératrice peut produire davantage d'énergie. Toutefois, cette augmentation s'arrête quand la vitesse nominale est atteinte. Au-delà de cette limite, généralement fixée à 12 m/s, la production est limitée afin de protéger la génératrice contre d'éventuels dommages. Les éoliennes sont habituellement arrêtées lorsque les vents dépassent les 25 m/s afin de préserver l'intégrité structurelle de l'éolienne. [10]

I.2.a.c. Potentiel du vent en Algérie

Le potentiel du vent varie en fonction de la localisation géographique. Dans les régions du nord du pays, la vitesse moyenne des vents est modérée (1 et 4 m/s), avec des microclimats favorables dans des zones telles qu'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique est adapté au pompage de l'eau, en particulier dans les Hauts Plateaux. Dans le sud du pays, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4 m/s, en particulier dans la région du sud-ouest, avec des vents pouvant dépasser les 6 m/s dans la région d'Adrar. [4]

I.2.a.d. Avantages et inconvénients de l'énergie du vent**❖ Avantages [6]**

- L'énergie éolienne est propre, fiable, économique et respectueuse de l'environnement.
- L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la moins coûteuse.
- Elle est une source d'énergie locale qui répond aux besoins énergétiques locaux.
- L'énergie éolienne génère plus d'emplois par unité d'électricité produite que toute autre source d'énergie traditionnelle.
- Elle peut rivaliser avec des sources d'énergie traditionnelles telles que le nucléaire, le charbon et le gaz lorsqu'elle est traitée de manière équitable.

❖ Inconvénients [2]

- Le vent peut parfois varier en intensité de manière irrégulière.
- Les éoliennes peuvent être bruyantes et avoir un impact visuel sur le paysage local.
- La production d'énergie éolienne dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

I.2.b. Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une source propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable, la mise en service est simple et très rapide. L'énergie hydraulique est produite par le déplacement ou l'accumulation d'un fluide incompressible, tel que l'eau douce ou l'eau de mer, Ce déplacement génère un travail mécanique qui peut être utilisé directement ou converti en électricité. Il existe trois types de l'hydraulique, marémotrice, hydrolienne et barrage hydraulique. [11]

I.2.b.a. Production de l'énergie électrique à partir de l'énergie hydraulique**❖ Fonctionnement d'une centrale hydraulique**

Les centrales hydroélectriques transforment l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique. L'énergie issue du mouvement de l'eau lors d'une chute est d'abord convertie en

énergie mécanique par une turbine hydraulique. Cette turbine entraîne ensuite un alternateur, où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. [3]

La figure (I.3) représente le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

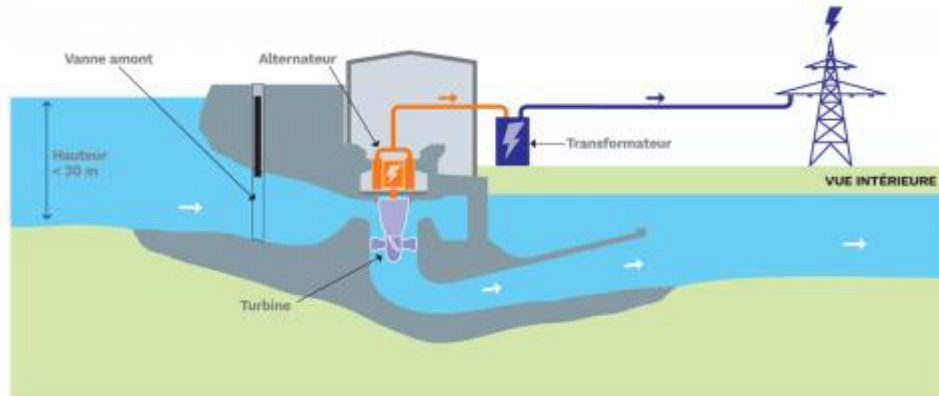


Figure I.3 : Fonctionnement d'une centrale hydraulique [3]

I.2.b.b. Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique

❖ Avantages [10]

- Flexibilité d'utilisation.
- Absence d'émissions de CO₂.
- Production d'énergie active pendant les périodes de forte demande en électricité.
- Capacité de pompage pendant les périodes creuses pour reconstituer les réserves d'eau dans le bassin de retenue.
- Démarrage et arrêt rapides des centrales.
- Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).
- Haute efficacité des machines, capable de convertir jusqu'à 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.

❖ Inconvénients [10]

- Contraintes géographiques.
- Impacts environnementaux lors de la construction.
- Inondation de certaines zones lors de la construction de barrages.
- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.

I.2.c. La biomasse

La biomasse est constituée de l'ensemble des matières organiques, qu'elles soient d'origine végétale ou animale. Elle peut provenir de diverses origines, notamment des forêts,

des environnements marins et aquatiques, des haies, des parcs et jardins, ainsi que des industries qui produisent des co-produits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage. [1]

La biomasse se divise en quatre catégories distinctes, la biomasse sèche qui inclut (bois, les déchets agricoles, ...), le biogaz, les déchets solides renouvelables d'origine domestique, et la biomasse humide qui inclut (bioéthanol, biodiesel, huile végétale, ...). [12]

Les énergies liées à la biomasse peuvent être regroupées en trois catégories principales.

- **Bois :** Le bois-énergie a été traditionnellement employé comme une source d'énergie polyvalente. Il constitue une solution pour le chauffage des bâtiments collectifs et résidentiels, généralement en complément des énergies fossiles telles que le fioul ou le gaz, tout en pouvant également être utilisé pour la production d'électricité. [3]
- **Biogaz :** est un gaz produit par la fermentation de matières organiques d'origine animale ou végétale en l'absence d'oxygène. Ce processus de fermentation, également appelée méthanisation, se produit de manière naturelle dans des milieux tels que les marais ou de manière spontanée dans les décharges contenant des déchets organiques. Il est également envisageable de le générer artificiellement dans des digesteurs, qui sont utilisés pour le traitement des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles, ainsi que d'autres matières. Le biogaz peut être utilisé directement dans des chaudières, des groupes électrogènes ou des générateurs d'air chaud. [3]
- **Biocarburant :** La biomasse présente un autre avantage, celui de permettre la fabrication de biocarburants, qui se déclinent en deux types : les éthanol et les biodiesels. Les éthanol, adaptés aux moteurs à essence, sont produits à partir de diverses plantes telles que le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le processus implique l'extraction du sucre de la plante, suivi d'une fermentation pour obtenir de l'éthanol. Quant aux biodiesels, ils sont extraits de sources oléagineuses telles que le colza, le tournesol, le soja, etc. Les esters d'huile obtenus peuvent ensuite être mélangés au gazole. Généralement, ces biocarburants sont mélangés aux carburants traditionnels tels que l'essence et le gazole. Ils entraînent une légère réduction des émissions de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz à effet de serre. Cependant, ces biocarburants présentent un

inconvenient majeur : ils requièrent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières. [13]

I.2.c.a. Production de l'énergie électrique à partir de la biomasse

L'énergie contenue dans la biomasse est transformée en énergie thermique par le biais de la combustion. Cette énergie thermique est ensuite utilisée pour produire de la vapeur, qui actionne une turbine à vapeur connectée à un alternateur qui transforme alors l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou de l'énergie thermique restante peut également être utilisée à d'autres fins, comme l'alimentation d'un système de chauffage. Dans ce cas, il s'agit d'un processus de cogénération, où l'énergie thermique est utilisée simultanément pour la production d'électricité et la génération de chaleur. [3]

La figure (I.4) représente le fonctionnement d'une centrale de biomasse.

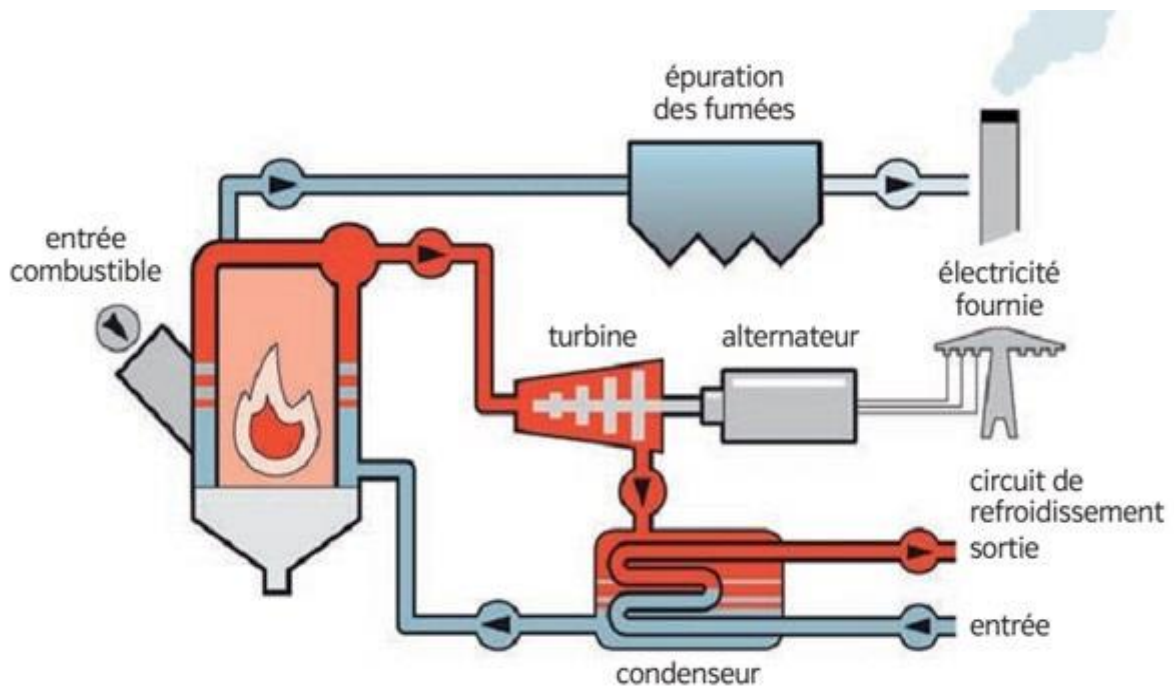


Figure I.4 : Fonctionnement d'une centrale biomasse [3]

I.2.c.b. Avantages et inconvénients de la biomasse

❖ Avantages [6]

- La biomasse permet également le traitement et la destruction des déchets organiques.
- Elle n'a pas d'impact sur l'effet de serre.
- C'est une source d'énergie moins polluante que les énergies fossiles.
- Les ressources en biomasse sont disponibles à grande échelle.

❖ Inconvénients [3]

- Épuisement des stocks.
- Génératrice de CO₂.
- Rendement parfois faible.

I.2.d. La géothermie

La géothermie est une source d'énergie thermique naturelle qui dépend de l'exploitation de la chaleur produite par la croûte terrestre pour générer de l'électricité (à partir d'une température comprise entre 90° et 150°) ou de la chaleur (à partir d'une température inférieure à 90°). Comparée à d'autres sources d'énergie renouvelable, la géothermie présente l'avantage de ne pas être influencée par les conditions atmosphériques telles que la pluie, le soleil ou le vent. [11]

Il existe quatre catégories de géothermie : la géothermie à haute, à moyenne, à basse et à très basse énergie :

- **Géothermie à haute énergie (>150°C)**: appelée géothermie profonde, également connue sous le nom de géothermie à haute enthalpie, est une source d'énergie qui se trouve dans des réservoirs situés généralement à plus de 1500 mètres de profondeur. Ces réservoirs ont des températures supérieures à 150°C. Grâce à ces températures élevées, il est possible de produire de l'électricité et d'effectuer de la cogénération. [13]
- **Géothermie à moyenne énergie (100 – 150°C)** : la géothermie profonde implique l'utilisation de la chaleur provenant des nappes souterraines dans des régions géologiques spécifiques. Après avoir effectué un forage, un fluide thermique tel que le fréon ou l'ammoniac est injecté dans le sol. Ce fluide se réchauffe et est ensuite ramené à la surface, où il est utilisé pour produire de l'électricité et fournir de la chaleur aux bâtiments ainsi que de l'eau chaude sanitaire. [13]
- **Géothermie à basse énergie (30 – 100°C)** : elle est définie lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau comprise entre 30°C et 100°C. Cette technologie est principalement utilisée pour le chauffage urbain collectif à travers des réseaux de chaleur, ainsi que pour certaines applications industrielles. [13]
- **Géothermie à très basse énergie (<30°C)** : elle exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres de profondeur, où les eaux ont une température inférieure à 30°C. Cette technologie est utilisée pour des applications telles que la climatisation passive, le

chauffage et la climatisation avec une pompe à chaleur géothermique qui extrait la chaleur contenue dans le sol. [13]

I.2.d.a. Production de l'énergie électrique à partir de la géothermie

L'énergie géothermique est exploitée en utilisant la chaleur stockée dans des roches proches de la surface, qui s'est propagée depuis des zones plus profondes de la terre. Pour remonter à la surface, la chaleur a besoin d'un vecteur fluide, naturel ou injecté, qui s'infiltre en grande quantité dans des roches poreuses et perméables. Ces roches sont protégées par des roches imperméables qui empêchent ou limitent la dispersion des fluides et de la chaleur. Dans un système géothermique, l'eau pénètre dans le sous-sol à travers des roches perméables formant des nappes souterraines, se réchauffe jusqu'à atteindre des températures de plusieurs centaines de degrés grâce à la chaleur transmise aux roches par une masse magmatique, puis remonte le long des failles et des fractures en donnant lieu à des manifestations géothermiques. Le fluide capté est ensuite traité et envoyé vers les installations d'utilisation, telles que la production d'énergie électrique ou l'utilisation directe. [5]

La figure (I.5) représente le fonctionnement d'une centrale géothermique

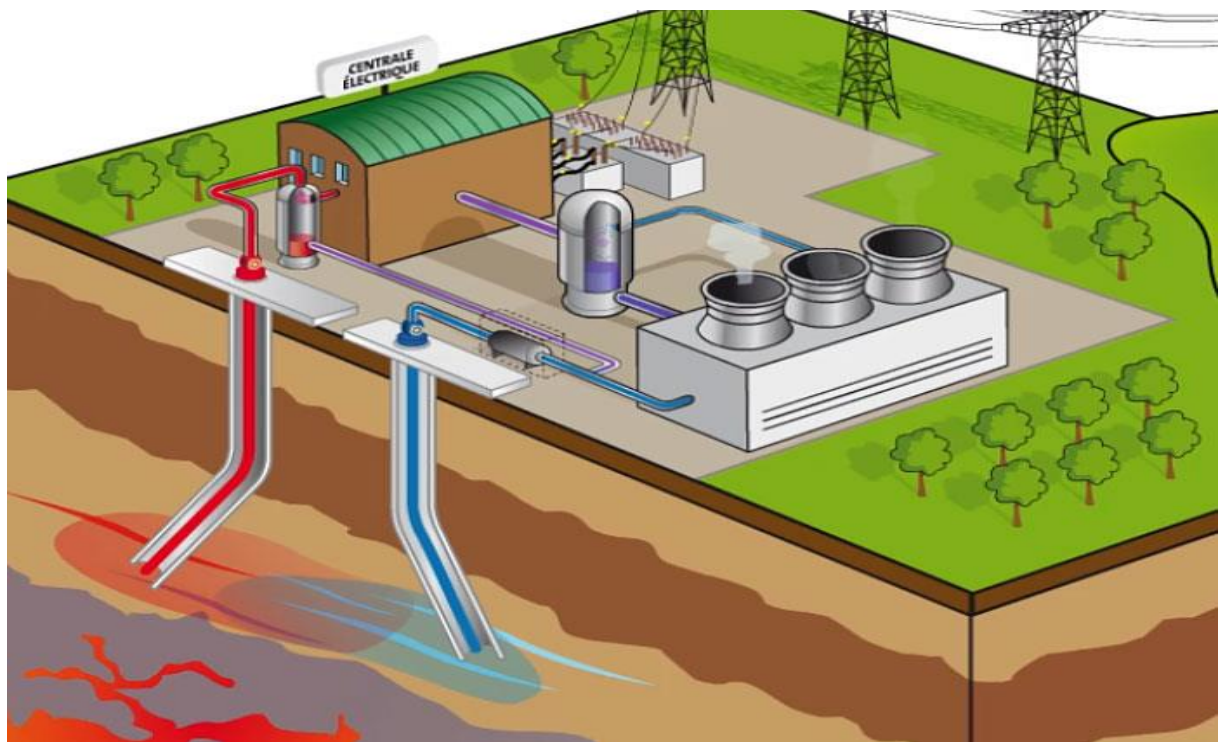


Figure I.5 : Fonctionnement d'une centrale géothermique [5]

I.2.d.b. Avantages et inconvénients de la géothermie

❖ Avantages [6]

- L'énergie géothermique est considérée comme respectueuse de l'environnement.

- La géothermie peut être utilisée pour le chauffage et le refroidissement des maisons.
- La géothermie est une source d'énergie fiable.

❖ **Inconvénients [6]**

- Coûts élevés.
- Risque d'affaissements de terrain.
- Rentabilité obtenue qu'après cinq ans de son utilisation.

I.2.e. L'énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie quasiment inépuisable à notre échelle, qui envoie chaque année vers la surface de la terre un rayonnement équivalent à environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. [9]

I.2.e.a. L'énergie solaire dans le monde

En 2019, environ 115 gigawatts de panneaux solaires ont été installés à travers le monde, ce qui a porté la capacité totale d'énergie solaire photovoltaïque installée à 627 gigawatts à l'échelle mondiale. [6]

D'après le tableau (I.2) présenté ci-dessous, la Chine, les États-Unis et le Japon sont les trois principaux producteurs d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Pays	Production (Twh)	National (%)
Chine	176.9	2
Etats-Unis	81.2	2
Japan	62.6	6

Tableau I.2 : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire en 2018 [6]

I.2.e.b. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie fait partie des pays du bassin méditerranéen ayant accès à l'un des plus grands gisements solaires. Les saisons influencent le rayonnement solaire dans les régions côtières, tandis que les régions sahariennes reçoivent une quantité d'énergie plus importante, mais sont caractérisées par des températures plus élevées. En tenant compte de cette diversité, le potentiel énergétique total est estimé à 169 400 TWh/an, soit environ 5000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays. [12]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau (I.3).

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heurs/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.3 : répartition du potentiel solaire en Algérie [6]

La figure (I.6) représente la carte de l'ensoleillement solaire en Algérie

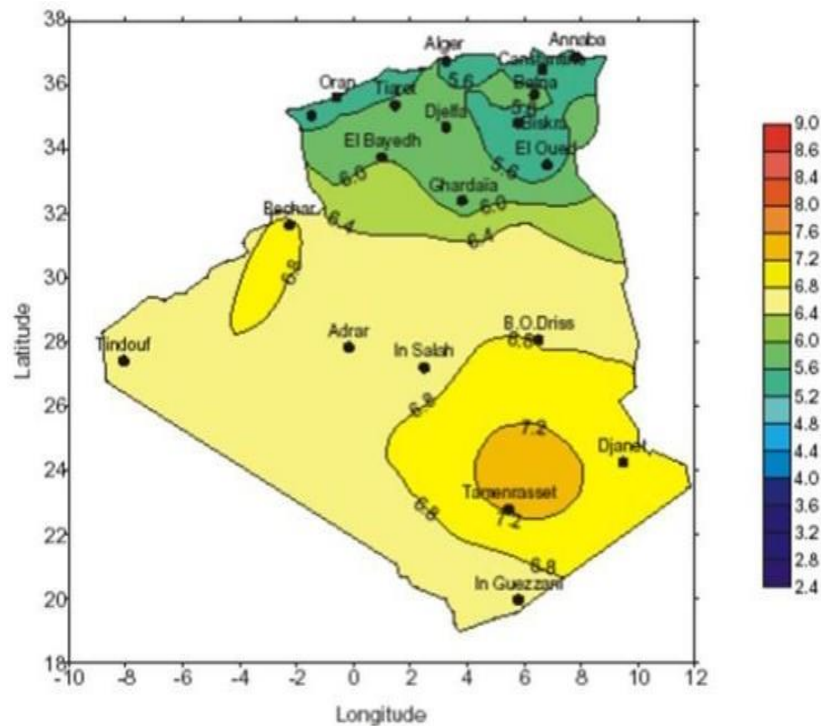


Figure I.6 : Carte d'éclairement solaire en Algérie [6]

I.2.f. Exploitation de l'énergie solaire

L'énergie solaire est utilisée principalement pour deux applications : la production de chaleur et la production d'électricité. [9]

I.2.f.a. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est obtenue en captant la lumière du soleil à l'aide de capteurs solaires thermiques vitrés. Cette énergie est utilisée pour chauffer directement l'eau et les espaces. Après avoir été concentrée par les panneaux, la chaleur est ensuite transférée à un fluide caloporteur. [12]

❖ Fonctionnement de l'énergie solaire thermique

- Un système de capture d'énergie solaire utilise un capteur composé de tubes métalliques noirs qui absorbent le rayonnement solaire, chauffant le liquide à l'intérieur. L'eau froide

- mélangée à de l'antigel circule dans les tubes pour assurer le bon fonctionnement. Le capteur est placé dans un réceptacle isolé avec une vitre résistante aux intempéries. [3]
- Transport de la chaleur : Un circuit primaire hermétique et isolé thermiquement contenant un fluide caloporteur se réchauffe en circulant à travers les tubes du capteur solaire. Ensuite, il se dirige vers un ballon de stockage où il transfère sa chaleur solaire à un échangeur thermique à l'intérieur du ballon d'eau. Ce processus se répète continuellement tant que l'ensoleillement est suffisant. [12]
 - Ballon de stockage : La réserve d'eau chaude sanitaire est constituée d'un réservoir métallique bien isolé. Lorsque de l'eau chaude est prélevée, elle est immédiatement remplacée par de l'eau froide provenant du réseau. Cette eau froide est instantanément réchauffée par le liquide du circuit primaire. [10]
 - La circulation du liquide primaire peut être naturelle ou forcée. En circulation naturelle, le fluide se déplace par thermo-circulation en raison de sa différence de densité avec l'eau du ballon. En circulation forcée, une pompe électrique est utilisée pour faire circuler le fluide lorsque sa température est supérieure à celle du ballon. [10]
 - Chaudière d'appoint : En cas de faible ensoleillement, un dispositif d'appoint est utilisé pour garantir la production d'eau chaude. Il peut être composé d'un serpentin relié à une chaudière ou d'un deuxième ballon avec un réchauffeur électrique. [10]

La figure (I.7) représente le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.

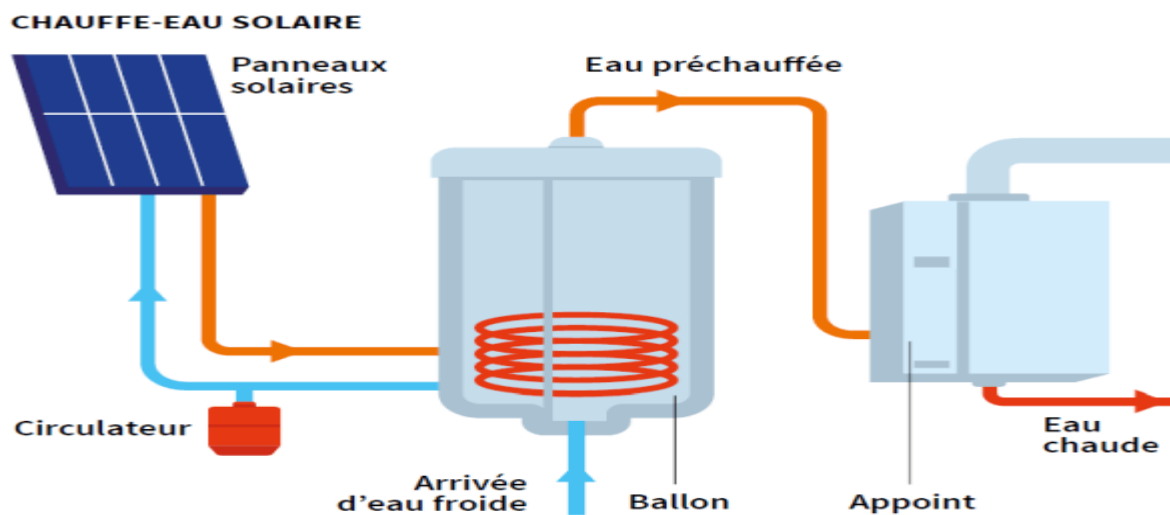


Figure I.7 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire [10]

❖ Avantages et inconvénients de l'énergie solaire thermique

❖ Avantages [10]

- Un rendement élevé pouvant atteindre 80%.

- Une source d'énergie inépuisable.
- Un potentiel de développement important.

❖ **Inconvénients [10]**

- Habituellement utilisé pour chauffer l'eau chaude sanitaire.
- Le temps nécessaire pour récupérer son investissement est généralement assez long, avec une moyenne de 10 à 15 ans.
- Certains panneaux solaires thermiques sont sensibles aux conditions météorologiques et peuvent être endommagés par la grêle, le gel, et d'autres facteurs.

I.2.f.b. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ce processus de conversion est réalisé à l'aide de cellules photovoltaïques (PV) qui exploitent l'effet photovoltaïque, un phénomène physique où la surface de la cellule génère une force électromotrice lorsqu'elle est exposée à la lumière. Les modules photovoltaïques, composés de ces cellules, sont utilisés pour cette conversion. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se), etc. Actuellement, le silicium est le matériau le plus couramment utilisé en raison de son abondance dans la nature. La tension générée varie en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. [14]

Le solaire photovoltaïque présente un énorme potentiel en Algérie pour le développement des systèmes photovoltaïques. Avec son climat ensoleillé et ses vastes étendues désertiques, le pays bénéficie d'un ensoleillement généreux tout au long de l'année. Ce potentiel solaire représente une opportunité majeure pour diversifier et renforcer le mix énergétique du pays. En investissant dans l'énergie solaire, l'Algérie peut non seulement répondre à sa demande croissante en électricité, mais aussi réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et diminuer ses émissions de gaz à effet de serre. De plus, en exploitant cette ressource gratuite et renouvelable, l'Algérie peut créer des emplois locaux, développer une industrie solaire compétitive et stimuler son économie. Par conséquent, la politique énergétique du pays devrait mettre l'accent sur le développement du solaire photovoltaïque, favorisant ainsi la transition vers une énergie propre, durable et respectueuse de l'environnement.

Pour ces multiples avantages, nous avons choisi d'étudier le solaire photovoltaïque et afin d'approfondir notre étude de l'énergie solaire photovoltaïque, il convient d'examiner les différents aspects de cette technologie, y compris les principes de base de la conversion

photovoltaïque. Il est important de comprendre comment les cellules solaires transforment la lumière du soleil en électricité.

I.3. Étude des systèmes photovoltaïques

L'étude des systèmes photovoltaïques nécessite des compétences techniques et une compréhension approfondie des principes de base de l'énergie solaire et des technologies associées. Elle est essentielle pour concevoir, installer et exploiter efficacement des systèmes photovoltaïques dans diverses applications. [3]

I.3.a. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque (PV) est le plus petit composant d'un système photovoltaïque. Elle est constituée de matériaux semi-conducteurs de type P-N et transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à un phénomène connu sous le nom d'"effet photovoltaïque". Cette transformation repose sur trois mécanismes essentiels [3]:

- Absorption des photons par le matériau de la cellule.
- Conversion de l'énergie des photons en énergie électrique, ce qui engendre la création de paires d'électrons et de trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées à l'intérieur de la cellule. [3]

I.3.a.a. L'effet photovoltaïque

Cela se produit lorsque survient une variation de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'effet d'un rayonnement lumineux. En disposant en série différents semi-conducteurs sensibles à la lumière, un dispositif se polarise. En effet, pour une longueur d'onde suffisamment courte, un photon avec une énergie égale ou supérieure à la bande interdite du semi-conducteur peut générer une paire électron-trou, ce qui engendre une différence de potentiel aux bornes du semi-conducteur. [3]

I.3.a.b. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est construite à partir de deux couches de silicium, l'une dopée avec du bore (P-dopée) et l'autre dopée avec du phosphore (N-dopée), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction PN, ce qui libère des électrons (charges N) et des trous (charges P). Une différence de potentiel se forme entre les deux couches de la cellule, ce qui peut être mesuré en prenant en compte la tension entre les bornes positives et négatives de la cellule. En appliquant une charge continue, il est possible d'accumuler davantage

de porteurs. La tension maximale que la cellule peut atteindre, environ 0,6 V, se produit lorsque le courant est nul, et est connue sous le nom de tension de circuit ouvert (VOC). D'autre part, le courant de court-circuit (ICC) est le courant maximum qui se produit lorsque les bornes de la cellule sont directement reliées entre elles, créant ainsi un court-circuit. [15]

La figure (I.8) représente la structure schématique d'une cellule PV

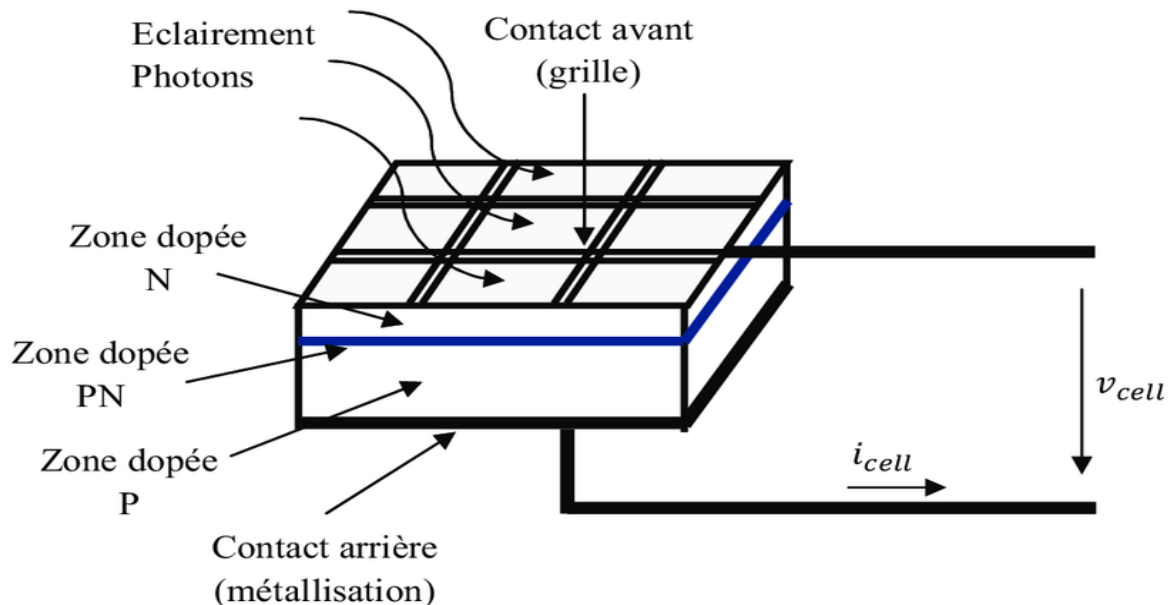


Figure I.8 : Schéma d'une cellule PV [15]

I.3.a.c. Différentes structure des cellules photovoltaïques

Afin d'améliorer les performances des cellules photovoltaïques et d'augmenter leur rendement, différentes structures et matériaux sont utilisés. On peut distinguer plusieurs types de cellules solaires en fonction de leur structure : les cellules solaires à couche mince, les cellules solaires organiques et les cellules solaires au silicium. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons principalement sur les cellules solaires au silicium, car elles sont les plus répandues et largement utilisées. [3]

❖ Les cellules photovoltaïques au silicium

Le silicium est le matériau fondamental des cellules photovoltaïques. Il est le deuxième élément le plus abondant sur notre planète, juste après l'oxygène, mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Il est principalement présent dans le sable et le quartz. Les cellules photovoltaïques au silicium se déclinent en trois catégories principales :

- **Le silicium monocristallin** : Actuellement, il reste l'option la plus couramment utilisée pour les cellules photovoltaïques commerciales, bien qu'il existe de

nombreux autres matériaux disponibles. La méthode de production de ces cellules est complexe et délicate, ce qui entraîne des coûts élevés. Cependant, elles offrent un rendement excellent, atteignant généralement de 12 % à 16 %, et pouvant atteindre jusqu'à 24 % en laboratoire. Le terme "cristallin" fait référence au fait que tous les atomes du matériau photovoltaïque actif sont disposés dans une structure cristalline ordonnée, sans perturbations dans l'arrangement des atomes.

[16]

- **Le silicium polycristallin** : est composé de petits grains de silicium cristallin et présente un coût de production plus bas. L'efficacité de conversion photovoltaïque pour une cellule basée sur du silicium polycristallin se situe généralement entre 11 % et 13 %, atteignant environ 18 % en laboratoire. [16]
- **Le silicium amorphe** : il est largement utilisé dans les situations où une solution économique est recherchée ou lorsqu'une faible quantité d'électricité est nécessaire, comme pour alimenter des montres, des calculatrices ou des luminaires de secours. Ces cellules se distinguent par un coefficient d'absorption élevé, ce qui leur permet d'avoir une épaisseur très faible, de l'ordre du micron. Cependant, leur rendement de conversion est compris entre 8 % et 10 %, atteignant environ 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée. [16]

La figure (I.9) représente les types de cellule PV au silicium

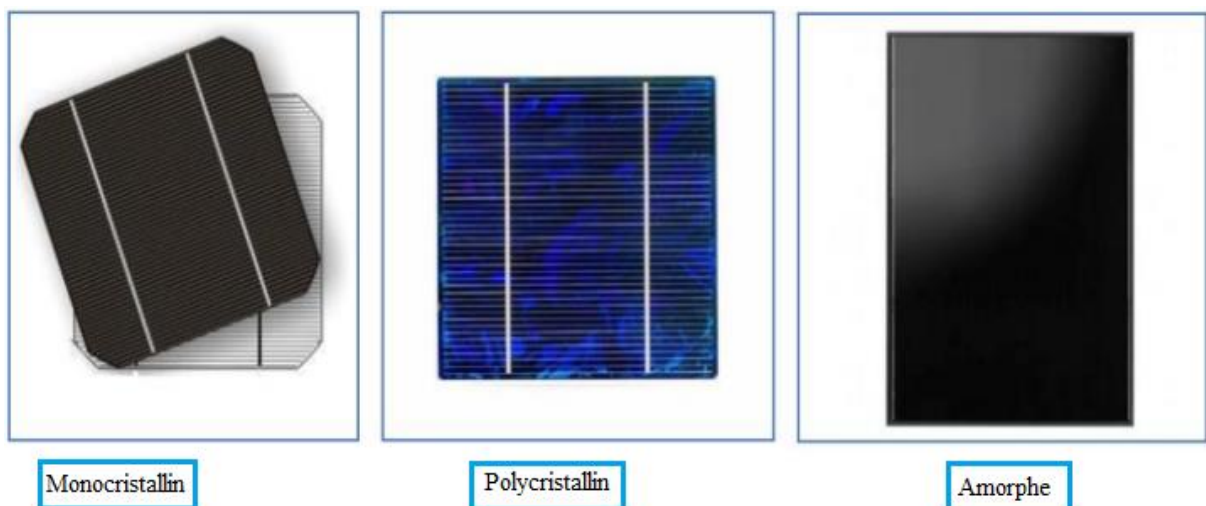


Figure I.9 : Types de cellules PV au silicium [16]

I.3.a.d. Modèle et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

On peut représenter une cellule photovoltaïque par un schéma électrique équivalent qui simule son fonctionnement lorsqu'elle est exposée à un faisceau de lumière. [3]

La figure (I.10) représente schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

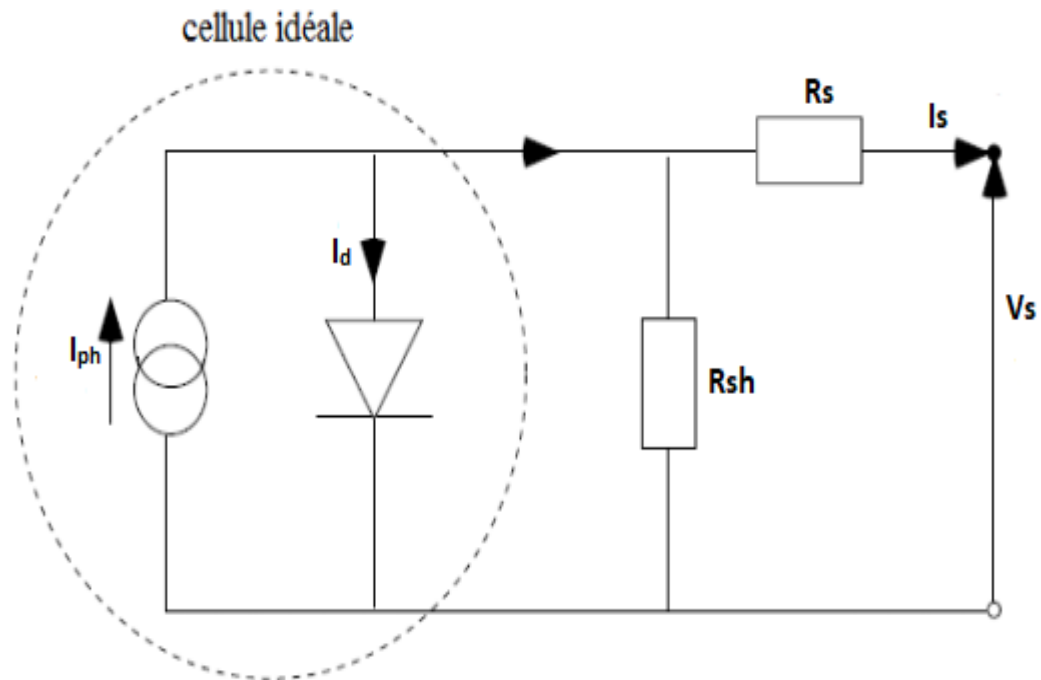


Figure I.10 : Circuit équivalent d'une cellule PV

Pour la cellule idéale :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.1)$$

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.2)$$

- ✓ Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant (I_{ph}) correspondant au courant photo-généré.
- ✓ La diode : représente la jonction P-N en modélisant le courant électrique à travers la diode (I_d).
- ✓ Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}).
- ✓ La résistance série R_s : représente les pertes de résistance à l'intérieur de la cellule photovoltaïque, qui sont liées à l'impédance des électrodes et du matériau. Cela entraîne une différence de tension (V) entre les bornes de la cellule et la tension (V_j) aux bornes

de la jonction PN. Idéalement, ce terme devrait être aussi faible que possible pour limiter son impact sur le courant de la cellule. [3]

- ✓ La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspondant à une résistance de fuite entre les zones N et P de la jonction, cela signifie qu'une partie du courant (I_{ph}) sera dérivée à travers cette résistance et ne pourra pas être fournie à la charge. Il est préférable que cette résistance soit aussi élevée que possible. [3]
- ✓ Le courant de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

$V_{th} = \frac{KT}{q}$: le potentiel thermique en Volt (V)

K : la constante de Boltzmann (1.380649×10^{-23} J/K)

T : la température absolue en Kelvin (K)

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C)

- ✓ L'équation de la caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ($G_{sh} = 1/R_{sh}$) pour écrire l'équation (I.2) sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (I.5)$$

I_s : le courant de saturation en Ampère (A)

n : le facteur de qualité de la diode

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

I_{ph} : photo-courant généré (proportionnel au rayonnement incident). [3]

I.3.a.e. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque

❖ Caractéristique électrique puissance-tension (P-V)

La caractéristique puissance-tension (P-V) d'une cellule PV est dérivée de sa caractéristique courant-tension (I-V). [17]

La figure (I.11) représente la caractéristique puissance-tension (P-V).

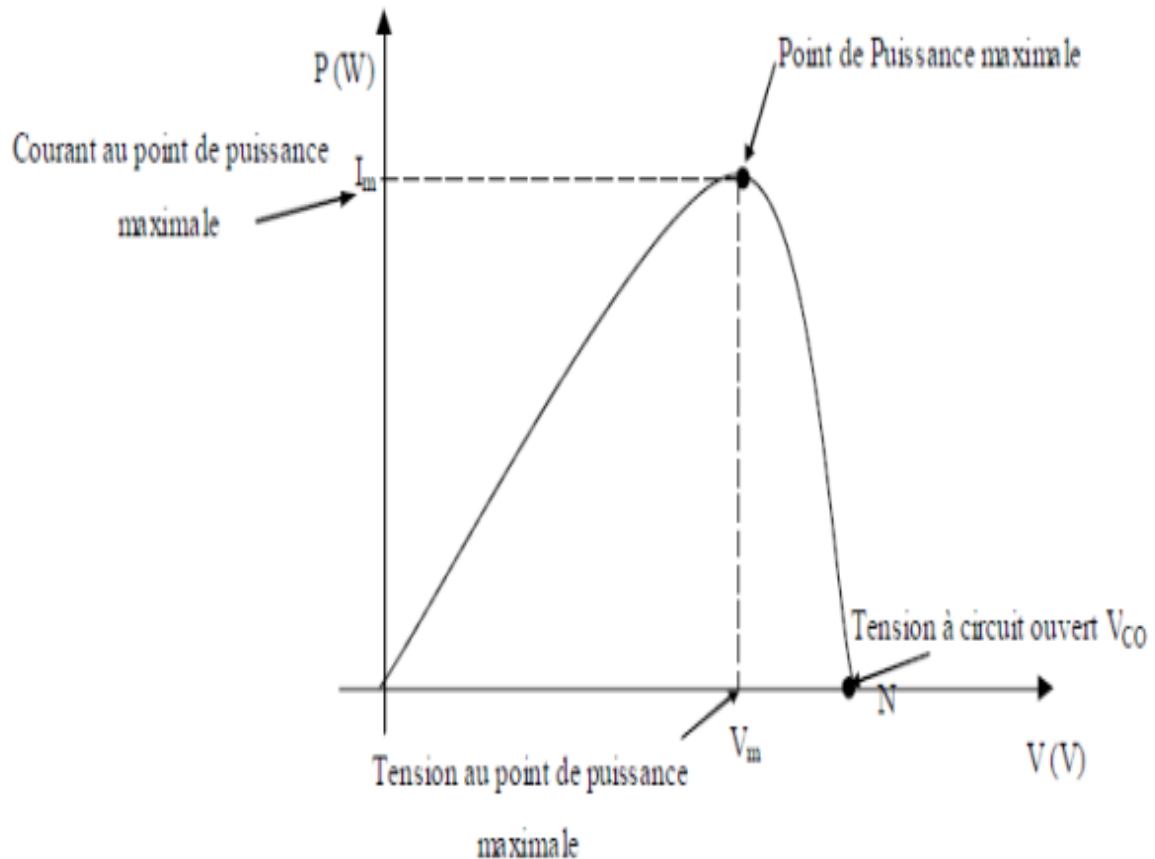


Figure I.11 : Caractéristique puissance-tension pour une cellule PV [17]

❖ Caractéristique électrique courant-tension (I-V)

Si la résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec la courbe de charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec une pente de $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est faible, le point de fonctionnement se situe dans la région MB de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). Dans cette configuration, la cellule agit comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est élevée, la cellule fonctionne dans la région CN. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I . La cellule se comporte alors comme une source de tension, où la tension de fonctionnement à vide est presque égale à la tension de la cellule. Dans la région BC de la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni comme une source de courant, ni comme une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point où la puissance fournie est maximale pour des conditions d'ensoleillement et de température données. [17]

La figure (I.12) représente la caractéristique courant-tension

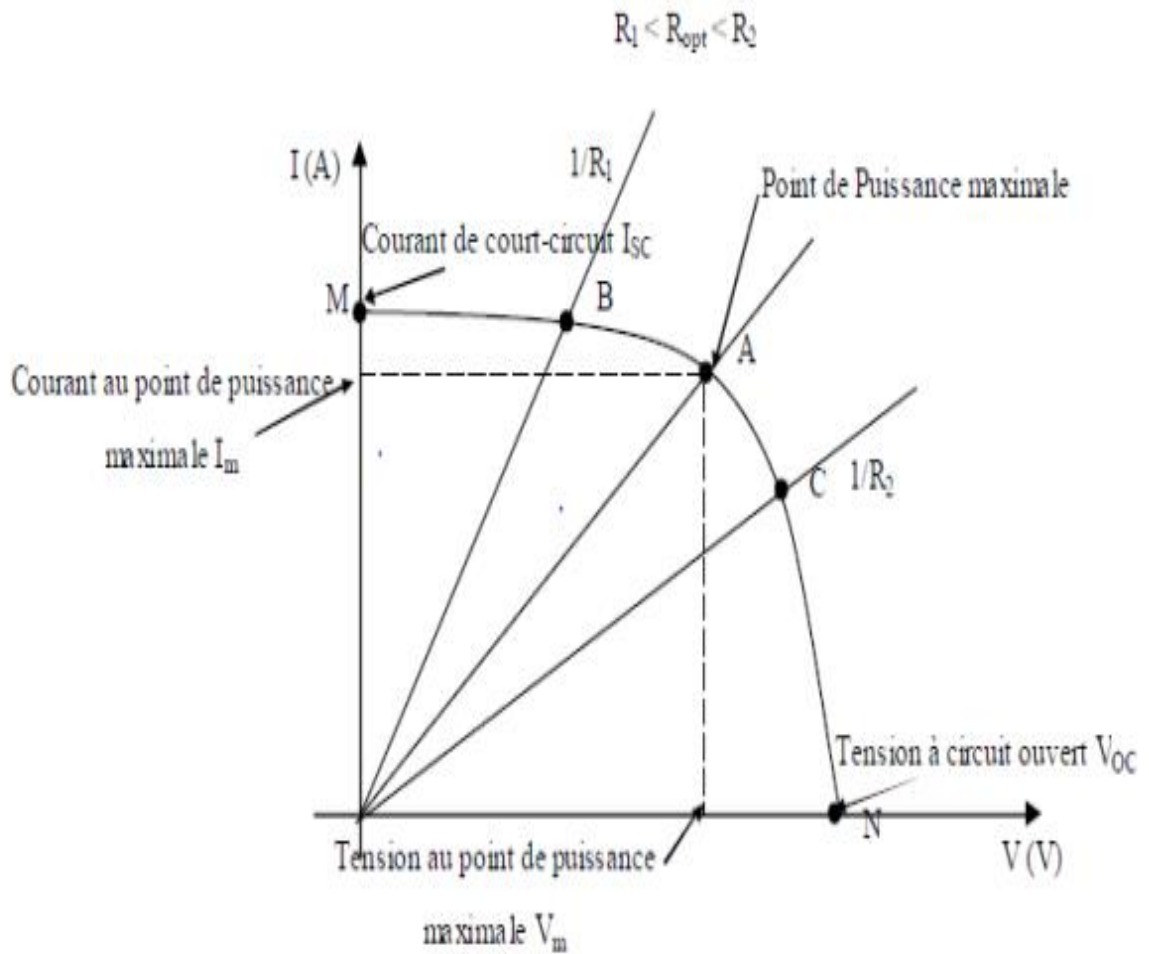


Figure I.12 : Caractéristique courant-tension pour une cellule PV [17]

La puissance générée par une cellule PV est donnée par :

$$P = V \times I \tag{I.6}$$

La puissance maximale P_m est obtenue lorsque :

$$\frac{dp}{dv} = 0 \tag{I.7}$$

On désigne par I_m , V_m respectivement le courant et la tension avec lesquels la puissance produite est maximale.

❖ Paramètres externes

La cellule solaire photovoltaïque possède plusieurs paramètres qui la caractérisent, tels que le rendement de conversion, la tension de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont déterminés à partir des

caractéristiques courant-tension, ce qui permet de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit [18] :

- ✓ **Courant de court-circuit I_{cc}** : il est le courant maximal qu'une cellule solaire peut produire. Il tend à augmenter avec l'intensité de l'éclairage. I_{cc} représente la valeur du courant lorsque la tension V est égale à zéro. Dans un cas idéal où la résistance série (R_s) est nulle et la résistance de fuite (R_{sh}) est infinie, ce courant de court-circuit se confond avec le courant photo-généré I_{ph} ($I_{cc} = I_{ph}$).
- ✓ **Tension à circuit ouvert V_{co}** : elle est la tension mesurée lorsque aucun courant ne circule à travers la cellule PV. Sa valeur dépend du type de cellule solaire, de l'intensité lumineuse et des matériaux utilisés dans la couche active.
- ✓ **Facteur de forme** : il est déterminé par plusieurs paramètres et est défini comme le rapport entre la puissance maximale et la puissance obtenue en multipliant la tension de circuit ouvert par le courant de court-circuit. Le facteur de forme est un indicateur de la performance électrique de la cellule, il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} \times V_{CO}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (I.8)$$

- ✓ **Le rendement de la cellule** : il est exprimé par le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (P_m) et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.9)$$

S : surface de la cellule en m^2

E : l'ensoleillement en W/m^2

I.3.a.f. Influence de l'ensoleillement et de la température

❖ Influence de l'ensoleillement

Une réduction de l'ensoleillement entraîne une diminution de la création de paires électron/trou, ce qui se traduit par une diminution du courant généré en l'absence de lumière. Le courant du panneau solaire est obtenu en soustrayant le courant photo-généré du courant de diode dans l'obscurité. Ainsi, une baisse de l'ensoleillement entraîne une diminution proportionnelle du courant solaire I_{cc} , accompagnée d'une légère diminution de la tension V_m . Par conséquent, le point P_m du panneau solaire se décale vers des puissances inférieures. [10]

Les figures (I.13) et (I.14) représentent un exemple des caractéristiques P(V) et I(V) d'un générateur photovoltaïque pour une température constante de 25°C et une variation de l'ensoleillement.

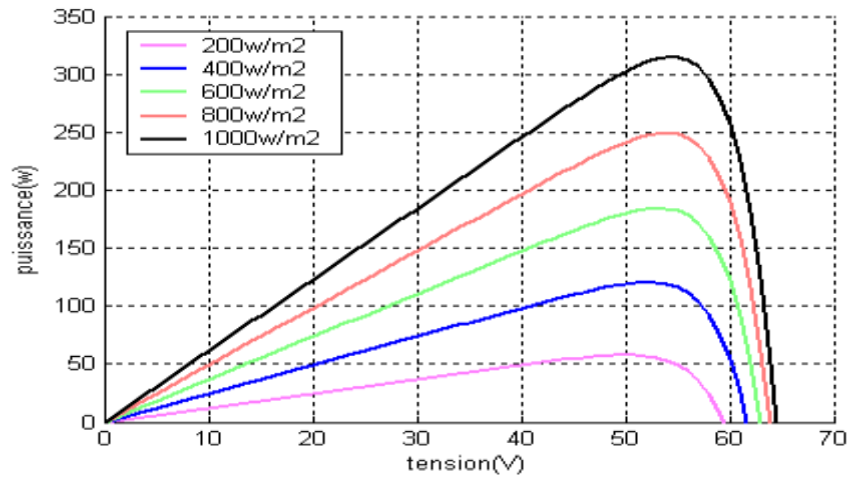


Figure I.13 : Caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$ [10]

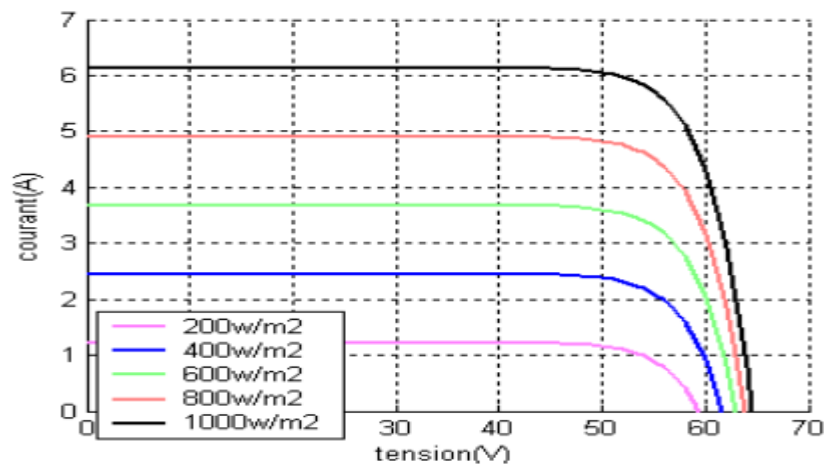


Figure I.14 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$ [10]

Il est évident que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit ouvert ne varie pas de la même manière, mais reste pratiquement constante même à faible ensoleillement. Cela implique donc :

- La puissance maximale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension. [10]

❖ **Influence de la température**

Les figures (I.15) et (I.16) présentent respectivement un exemple des caractéristiques P(V) et I(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque, à une

irradiation constante. Nous observons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. En revanche, la tension en circuit ouvert diminue assez fortement avec l'augmentation de la température. Cela indique que le panneau peut fournir une tension adéquate, même à faible ensoleillement, mais la puissance disponible diminue. [10]

Il est important de noter que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C. Enfin, il est à souligner que lorsque l'ensoleillement est inférieur à 100 W/m², la tension du panneau varie également. Elle diminue avec l'ensoleillement. [10]

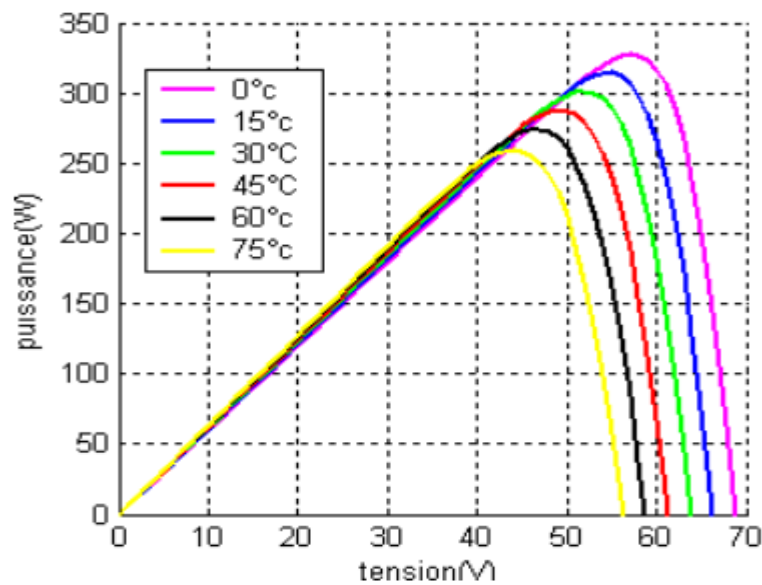


Figure I.15 : Caractéristique P=f(V) d'un GPV pour différentes températures à G=1000W/m² [10]

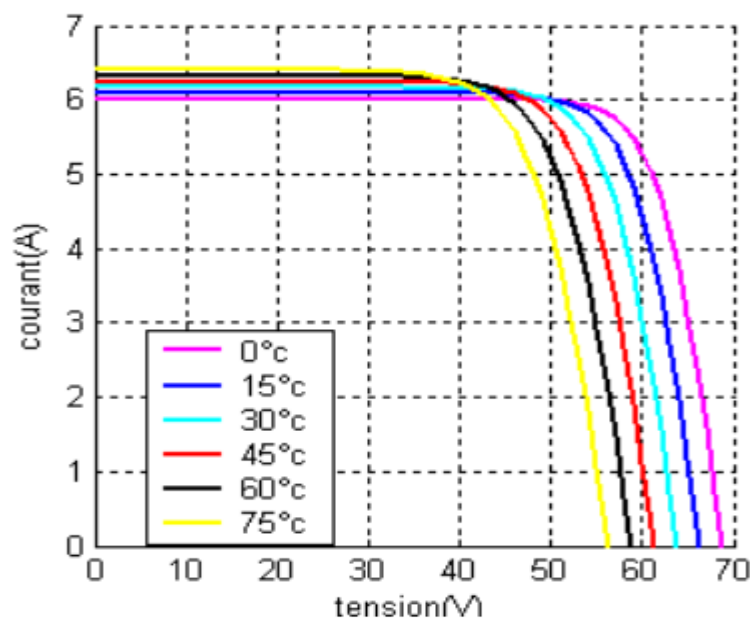


Figure I.16 : Caractéristique I=f(V) d'un GPV pour différentes températures à G=1000W/m² [10]

I.3.b. Association des cellules photovoltaïques (module photovoltaïque)

La cellule solaire, qu'elle soit de forme ronde ou carrée, est l'élément fondamental d'un système solaire. Un groupe de cellules forme un module solaire, où les cellules sont connectées électriquement entre elles et encapsulées pour les protéger des éléments extérieurs. Plusieurs modules constituent un panneau solaire. Plusieurs panneaux, accompagnés de dispositifs de protection, d'un régulateur, d'un système de stockage d'énergie (batterie) ainsi que d'appareils de contrôle et de mesure, forment un système solaire ou un champ solaire. [3]

La figure (I.17) représente la constitution d'un champ de module PV

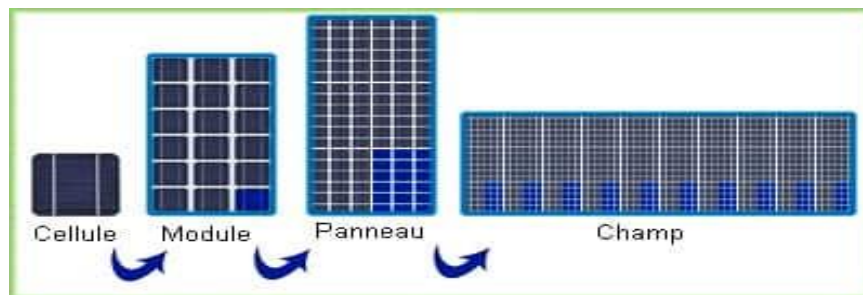


Figure I.17 : Composants d'un champ de module PV

Le terme "générateur photovoltaïque" (GPV) est utilisé pour désigner, en fonction du contexte, soit un module PV, soit un panneau PV. Cependant, il peut également faire référence à l'ensemble du système PV. La forme générale de la caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque est similaire à celle d'une cellule solaire individuelle. [3]

I.3.b.a. Association des cellules photovoltaïques en série

Une association de cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont parcourues par un courant commun et la caractéristique résultante de la configuration en série est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule. [19]

La figure (I.18) représente une association de 3 cellules PV en série.

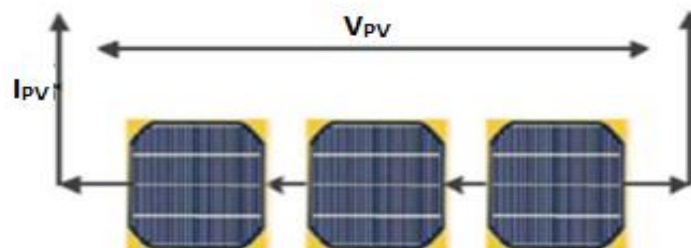


Figure I.18 : Schéma d'une association de 3 cellules PV en série

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{SCO} = N_s \times V_{CO} \tag{I.10}$$

$$I_{SCC} = I_{CC} \tag{I.11}$$

V_{CO} : la tension du circuit ouvert

$I_{SCC} = I_{CC}$: le courant de court-circuit

Les figures (I.19) et (I.20) représentent la caractéristique électrique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série de N_s cellules identiques (I_{sc} , V_{sc}).

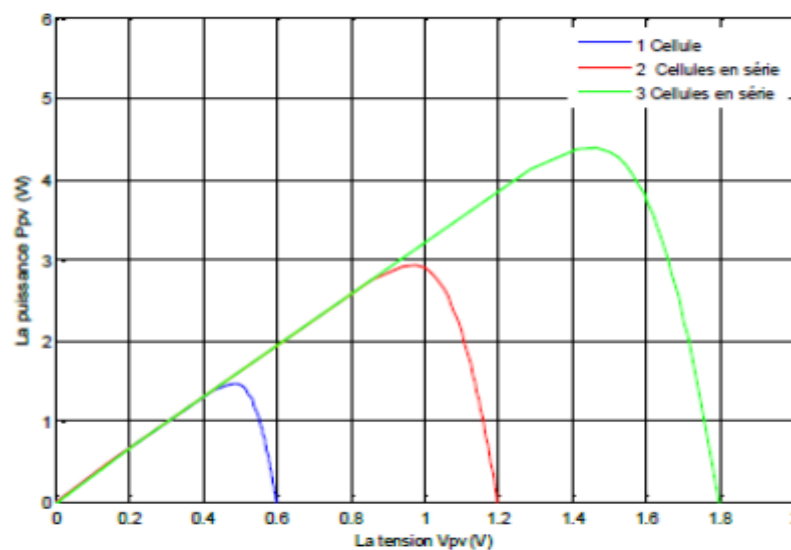


Figure I.19 : Caractéristique $P=f(V)$ des cellules PV raccordées en série [19]

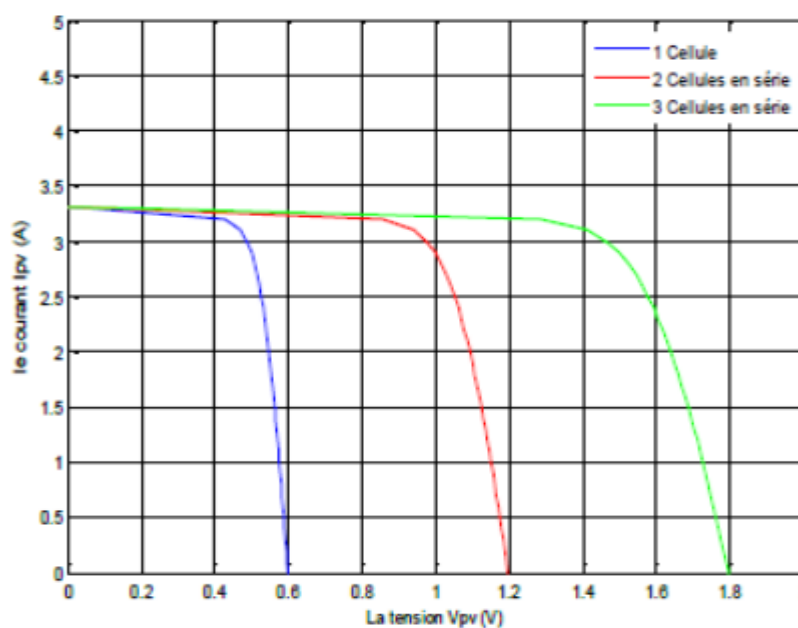


Figure I.20 : Caractéristique $I=f(V)$ des cellules PV raccordées en série [19]

I.3.b.b. Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Il est possible d'associer en parallèle (NP) cellules, ce qui permet d'augmenter le courant de sortie du générateur ainsi formé. Lorsque des cellules identiques sont connectées en parallèle, elles sont soumises à la même tension, et la caractéristique résultante du groupement est obtenue en additionnant les courants individuels. [19]

La figure (I.21) représente une association de 3 cellules en parallèle.

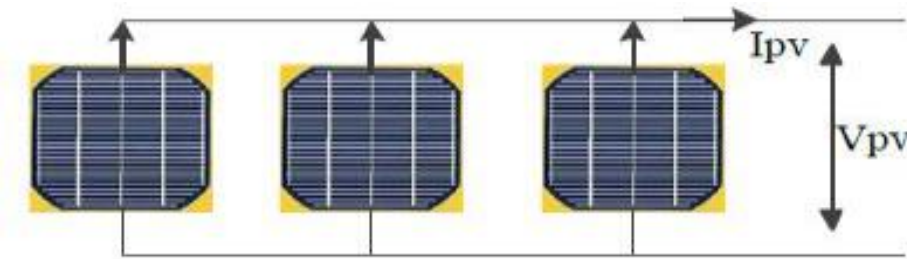


Figure I.21 : Schéma d'une association de 3 cellules PV en parallèle

$$I_{PCC} = N_P \times I_{CC} \tag{II.12}$$

$$V_{PCO} = ns \times V_{CO} \tag{II.13}$$

$I_{PCC} = np \times I_{CC}$: le courant de court-circuit

$V_{pco} = V_{co}$: la tension du circuit ouvert

Les figures (I.22) et (I.23) représentent la caractéristique électrique résultante (I_p, V_p) obtenue par l'association en parallèle N_p de cellules identiques (I_{pcc}, V_{pco}).

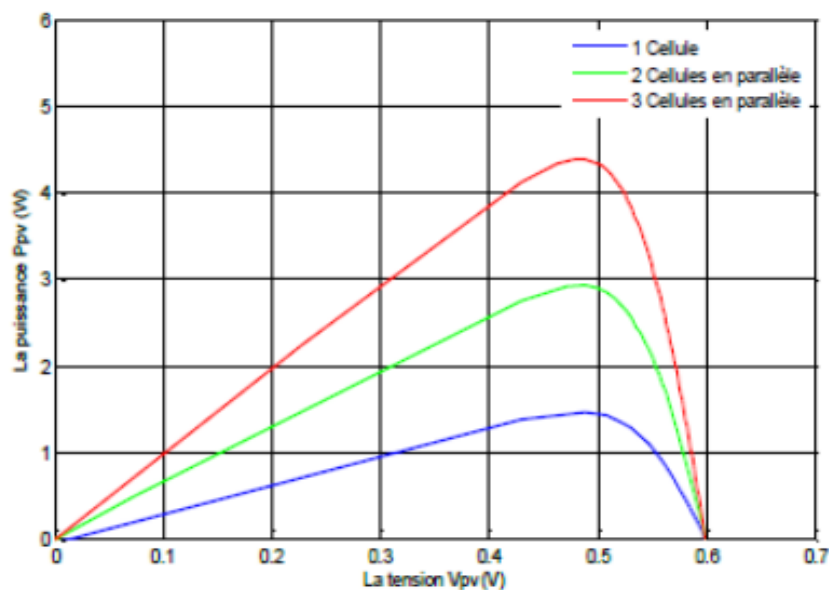


Figure I.22 : Caractéristique $P=f(V)$ des cellules PV raccordées en parallèle [19]

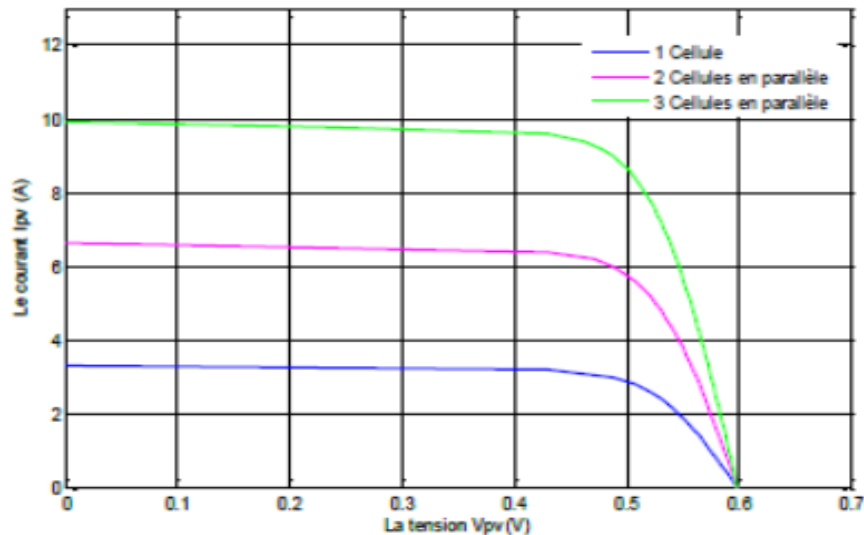


Figure I.23 : Caractéristique $I=f(V)$ des cellules PV raccordées en parallèle [19]

I.3.c. Le système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué d'un ensemble complet d'équipements PV conçus pour convertir la lumière du soleil en électricité. Il se compose généralement de cinq éléments clés : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge. [20]

La figure (I.24) représente les composants d'un système PV.

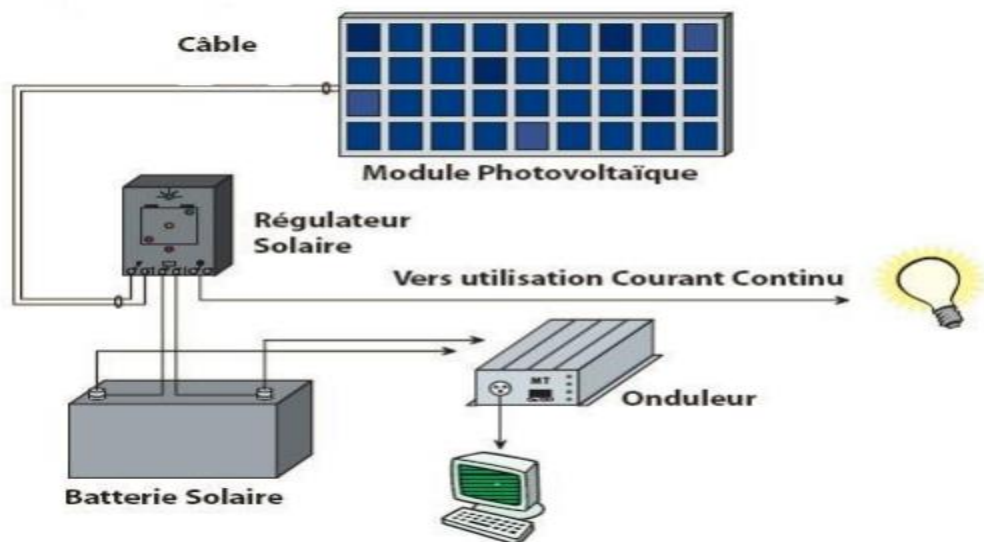


Figure I.24 : Les composants d'un système PV

Grâce au processus photovoltaïque, les panneaux solaires PV convertissent l'énergie solaire en courant continu (CC). Ce courant peut être utilisé directement ou converti en courant alternatif (CA) par un onduleur. L'excès d'énergie produit par le système est emmagasiné dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le régulateur contrôle la charge et la décharge des

batteries, assurant ainsi une régulation efficace entre la production, la consommation et le stockage d'énergie. [20]

I.3.c.a. Le panneau photovoltaïque

Le module ou panneau photovoltaïque est composé d'un groupe de cellules photovoltaïques connectées les unes aux autres. Sa fonction principale est de capter les rayons solaires et de les convertir en électricité. [3]

I.3.c.b. Batterie solaire

La batterie solaire a pour rôle de stocker le courant produit par le panneau PV afin de garantir l'autonomie du système. Sa durée de vie est déterminée par le nombre de cycles de charge et décharge. Elle est caractérisée par son ampérage en ampères-heures (Ah) et sa tension en volts. [3]

On trouve différents types de batteries solaires, tels que :

- ✓ **Batterie étanche :** il s'agit d'une batterie solaire scellée, étanche, sans entretien ni maintenance requise. Elle doit être installée à l'abri de la chaleur et de l'humidité, et ne doit pas être stockée pendant plus de 4 à 5 mois. Ce type de batterie est généralement coûteux, et une durée de vie allant de 7 à 10 ans. [3]
- ✓ **Batterie stationnaire solaire :** il s'agit d'une batterie solaire à électrolyte liquide, nécessitant un entretien régulier tel que l'ajout d'acide chlorhydrique ou d'eau distillée tous les 6 mois. Ce type de batterie est généralement moins cher et une durée de vie de 10 à 15 ans. [3]
- ✓ **Batterie à gel :** il s'agit d'une batterie solaire à électrolyte liquide spécialement conçue pour les environnements froids (neige, verglas, ...). Elle nécessite un entretien régulier, comme l'ajout de l'antigel mono-propylène glycol tous les 6 mois. Ce type de batterie a un prix moyen et une durée de vie de 15 ans. [3]

I.3.c.c. Le régulateur (contrôleur de charge)

Les régulateurs sont essentiels pour garantir la durabilité du système de stockage et minimiser les coûts d'installation. Leur rôle principal est le suivant :

- Contrôler la charge et la décharge de la batterie.
- Optimiser l'efficacité énergétique du système en agissant comme un point de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation. [21]

Pour fonctionner correctement, un régulateur nécessite un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il maintient l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil supérieur et un seuil inférieur. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est caractérisé par son ampérage en Ampère et sa tension en Volt. [21]

I.3.c.d. Le convertisseur d'énergie (onduleur)

Le convertisseur a pour rôle de transformer le courant continu produit par le système solaire en courant alternatif, ainsi que d'ajuster le voltage de sortie (par exemple, de 12 V, 24 V... à 220 V). Il est caractérisé par le voltage de sortie en volt et la puissance nominale qu'il est capable de fournir en watt. [21]

I.3.c.e. La charge

Elle englobe toutes les fonctions assurées par différents appareils connectés au système photovoltaïque. Étant donné les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques, il est important de définir les critères sur lesquels se baser pour choisir les charges à utiliser, qu'elles soient continues ou alternatives. [21]

I.3.d. Différents systèmes photovoltaïques

Les trois genres de systèmes PV que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. [3]

I.3.d.a. Systèmes autonomes

En fonction des besoins, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs qui se trouvent dans des zones isolées du réseau électrique. Ces systèmes sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande en électricité. [3]

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés dans des endroits où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut les classer en deux catégories :

- ✓ **Systèmes avec accumulateurs** : l'énergie excédentaire produite est stockée dans des batteries. [3]

Le schéma synoptique illustré dans la figure (I.25) présente la configuration de ce système.

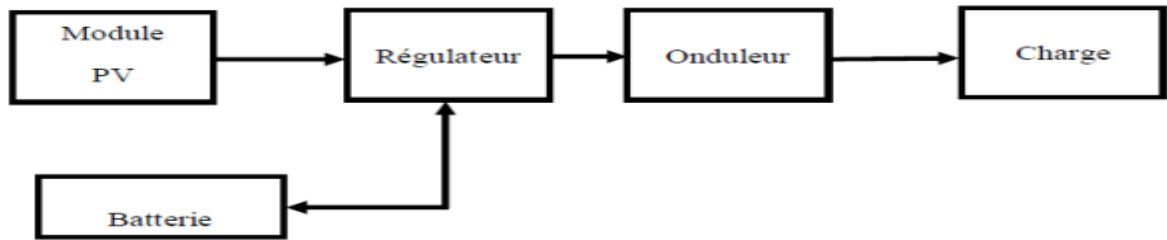


Figure I.25 : Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie

✓ **Systèmes sans accumulateurs** : dans ces systèmes sans batteries, il est possible d'utiliser d'autres formes de stockage qui ne sont pas de nature électrochimique.

Par exemple :

- Stockage par pompage : stockage en utilisant des réservoirs d'eau.
- Stockage de froid : stockage de la fraîcheur en utilisant des méthodes telles que le stockage de glace ou eutectique.
- Stockage d'hydrogène par électrolyse de l'eau. [22]

I.3.d.b. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont constitués d'une combinaison d'un générateur PV, d'une éolienne ou d'un groupe électrogène à combustible (module d'appoint), voire les deux simultanément. Lorsqu'il y a une combinaison de deux énergies renouvelables ou plus, on parle de jumelage. Le module d'appoint peut être utilisé selon deux stratégies :

- Charge des batteries : il charge les batteries du système.
- Alimentation directe de la charge et charge des batteries : il alimente directement la charge tout en rechargeant les batteries. [20]

Ce type de système est particulièrement adapté aux applications nécessitant une alimentation continue avec une puissance relativement élevée, surtout lorsqu'il y a une diminution de l'ensoleillement à certains moments de l'année. [20]

La figure (I.26) représente un exemple d'un système hybride PV + éolienne



Figure I.26 : Système hybride (photovoltaïque-éolienne) [20]

I.3.d.c. Systèmes connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques de ce type convertissent l'électricité en courant alternatif (CA) et injectent l'excédent d'énergie dans le réseau électrique lorsqu'ils produisent plus que ce qui est consommé. Ils peuvent ainsi récupérer de l'électricité à partir du réseau pendant la nuit ou lorsque l'ensoleillement est insuffisant. Parmi ces systèmes, on trouve [3]:

✓ Système PV directement relié au réseau

Le système est conçu pour échanger de l'énergie uniquement avec le réseau électrique. Aucune batterie n'est utilisée. L'absence des batteries présente un avantage car cela réduit les coûts du système photovoltaïque. De plus, les batteries nécessitent un entretien régulier et doivent être remplacées après quelques années [3], le schéma du système photovoltaïque directement connecté au réseau est illustré dans la figure (I.27) ci-dessous.

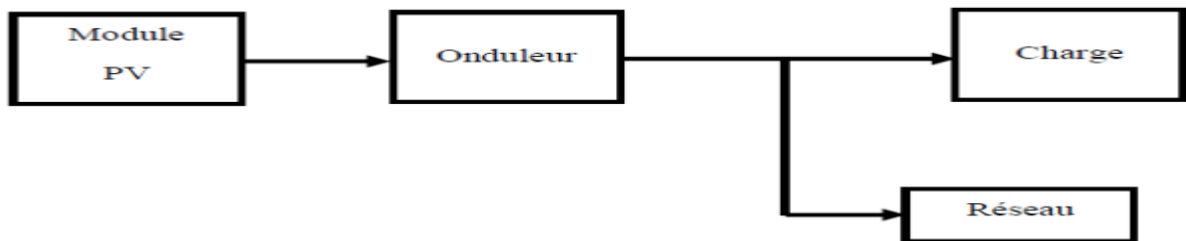


Figure I.27 : Système PV directement relié au réseau [3]

✓ Système PV relié au réseau avec batterie

Le système a la capacité de fournir de l'énergie au réseau et de prélever l'énergie supplémentaire nécessaire auprès du réseau. L'énergie est fournie par le module PV à la charge, et l'excédent est stocké dans les batteries. En cas de décharge ou de surcharge de la batterie, le réseau est utilisé pour prélever ou délivrer l'énergie. [20]

Le schéma du système PV relié au réseau avec batterie est illustré dans la figure (I.28) ci-dessous.

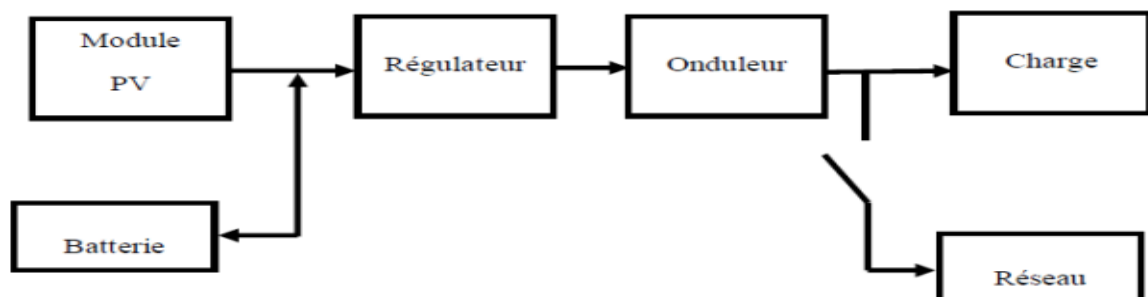


Figure I.28 : Système PV relié au réseau avec batterie [20]

I.3.e. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

On peut citer les avantages et les inconvénients suivants :

I.3.e.a. Avantages [3]

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et illimitée en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions nocives.
- Maintenance réduite grâce à l'absence de pièces mobiles ; durée de vie des modules solaires d'environ 20 ans.
- Rentabilité garantie pour les applications à faible puissance (moins de 3-5 kWh/jour).
- Possibilité d'adapter la taille du système selon les besoins actuels, avec la possibilité d'extension progressive en fonction de l'augmentation des besoins énergétiques.
- Risque réduit de choc électrique avec des tensions de 12 Vcc ou 24 Vcc, et risque d'incendie moins élevé par rapport aux groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fioul.

I.3.e.b. Inconvénients [3]

- L'investissement initial dans les panneaux photovoltaïques est élevé.
- La production d'énergie dépend de l'ensoleillement.
- Le rendement de conversion des modules photovoltaïques est relativement faible.
- L'utilisation de batteries pour le stockage de l'énergie électrique entraîne une augmentation du coût du système photovoltaïque.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques peut entraîner une certaine pollution.

I.4. Intégration des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques

C'est une nécessité pour l'exploitation efficace de l'énergie solaire. L'intégration des convertisseurs DC-DC dans les systèmes photovoltaïques est une pratique courante pour optimiser l'efficacité et la performance de l'ensemble du système. Les convertisseurs DC-DC sont utilisés pour convertir la tension continue (DC) produite par les panneaux solaires en une autre tension continue appropriée pour une utilisation spécifique.

Voici quelques cas d'utilisation courants des convertisseurs DC-DC dans les systèmes photovoltaïques :

- Adaptation de tension : Les panneaux solaires produisent généralement une tension spécifique qui peut varier en fonction des conditions d'ensoleillement. Cependant, la tension de sortie des panneaux solaires peut ne pas correspondre à la tension requise

pour charger les batteries ou alimenter les charges électriques. Dans de tels cas, les convertisseurs DC-DC sont utilisés pour ajuster la tension de sortie des panneaux solaires afin de correspondre aux besoins du système. Par exemple, un convertisseur abaisseur (Buck) peut être utilisé pour abaisser la tension, tandis qu'un convertisseur élévateur (Boost) peut être utilisé pour augmenter la tension.

- Suivi du point de puissance maximale (MPPT) : Le suivi du point de puissance maximale est une technique utilisée pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires. Les convertisseurs DC-DC avec fonction MPPT sont utilisés pour maintenir les panneaux solaires à leur point de fonctionnement optimal, en ajustant la tension et le courant pour extraire la puissance maximale des panneaux solaires, même dans des conditions variables d'ensoleillement. Cela permet d'optimiser la production d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale du système.
- Isolation galvanique : Dans certains systèmes photovoltaïques, il peut être nécessaire d'isoler électriquement certaines parties du système pour des raisons de sécurité ou de compatibilité. Les convertisseurs DC-DC isolés galvaniquement sont utilisés dans de tels cas pour assurer une séparation électrique entre les différentes parties du système, tout en permettant la conversion de tension requise.

L'intégration des convertisseurs DC-DC dans les systèmes photovoltaïques implique leur connexion aux panneaux solaires, aux batteries (le cas échéant) et aux charges électriques. Ils sont généralement montés près des panneaux solaires pour minimiser les pertes de conversion et peuvent être intégrés dans des armoires électriques ou des boîtiers étanches. Il est important de sélectionner des convertisseurs DC-DC de qualité et adaptés aux spécifications du système, en tenant compte de la puissance, de la tension d'entrée/sortie, de l'efficacité et d'autres caractéristiques pertinentes.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les énergies renouvelables, ainsi que les principes conduisant à la production d'électricité à partir de ces sources.

En favorisant l'utilisation accrue des énergies renouvelables, nous pouvons assurer la durabilité des ressources de la terre et réduire la dépendance aux énergies fossiles pour les générations à venir.

Nous avons examiné de près le principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque, qui transforme la lumière du soleil en électricité grâce à un système PV. Nous

nous sommes concentrés sur la cellule photovoltaïque et son schéma équivalent, en étudiant les différents paramètres du circuit qui nous ont permis de tracer les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons constaté que les performances d'un générateur photovoltaïque sont grandement influencées par les conditions météorologiques telles que la température et l'ensoleillement. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de la conception et de l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

Les cellules solaires photovoltaïques peuvent être associés en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéressera aux convertisseurs continu-continu DC/DC qui jouent un rôle essentiel dans l'exploitation efficace de l'énergie photovoltaïque et des techniques de recherche du point de puissance maximal (MPPT).



Chapitre II. Les convertisseurs
DC-DC

Chapitre II. Les convertisseurs DC-DC

II.1. Introduction

La production de puissance d'un générateur photovoltaïque (GPV) varie considérablement en fonction de l'ensoleillement, de la température et du type de charge connectée. Chaque charge présente son propre comportement distinct. De plus, le comportement de la charge a souvent une variation abrupte en fonction de la consommation des utilisateurs. Par conséquent, les performances des GPV se détériorent dans ces conditions. Afin de garantir que le GPV fournisse sa puissance maximale et fonctionne de manière efficace, une adaptation du générateur à la charge devient nécessaire. Cette adaptation est réalisée en insérant un convertisseur d'énergie DC-DC, également appelé "Hacheur", entre le GPV et la charge. Ce convertisseur permet d'ajuster et de réguler le flux d'énergie pour des applications en régime continu. [23]

Les convertisseurs DC-DC sont des circuits d'électronique de puissance qui permettent de convertir une source de courant continu en une tension continue avec un rapport de transformation bien défini. [3]

$$K = \frac{V_e}{V_s} \quad (II.1)$$

V_e : la tension d'entrée

V_s : la tension de sortie

K : le rapport de transformation

Ces convertisseurs sont utilisés pour convertir des niveaux de puissance allant de très bas (petites batteries) à très élevés (transmission de puissance à haute ou très haute tension). Ils sont largement utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique pour réguler et adapter la tension de sortie en fonction des besoins de la charge connectée. [24]

II.2. Hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques utilisés pour transférer l'énergie électrique d'une source continue à une autre source continue. En d'autres termes, un hacheur permet de générer une tension continue dont la valeur moyenne peut être ajustée à partir d'une source de tension continue. Lorsque l'entrée et la sortie ont des caractéristiques dynamiques différentes, on parle d'un hacheur à liaison directe, ce qui signifie qu'ils peuvent être directement connectés. En revanche, lorsque l'entrée et la sortie ont la même nature dynamique, on parle d'un hacheur

à accumulation, ce qui nécessite l'utilisation d'un élément de stockage temporaire. Enfin, si une isolation galvanique entre la sortie et l'entrée est nécessaire, on utilise des hacheurs isolés. La structure du montage varie en fonction du degré de réversibilité souhaité, et la technologie des composants diffère en fonction de la puissance nominale du système. [3]

La figure (II.1) représente le symbole d'un convertisseur DC-DC

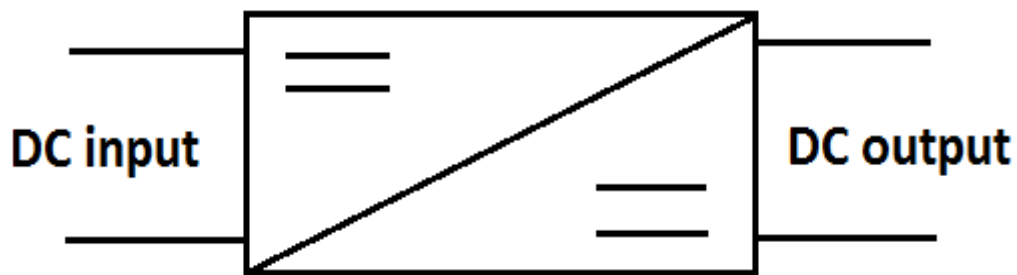


Figure II.1 : Symbole du convertisseur continu-continu

II.3. Convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques

Un hacheur peut être mis en œuvre en utilisant un interrupteur électronique commandé, tel qu'un transistor de puissance qui fonctionne en mode de commutation (0 ou 1), comme les thyristors GTO, les transistors bipolaires ou les transistors à effet de champ à grille isolée. Le principe du hacheur consiste à établir puis à interrompre périodiquement la connexion entre la source et la charge à l'aide de cet interrupteur électronique. L'interrupteur doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté pour obtenir une tension de sortie continue réglable. Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source de tension continue variable (panneau PV) à la charge qui requiert généralement une tension continue constante. [25]

La figure (II.2) représente les tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC-DC.

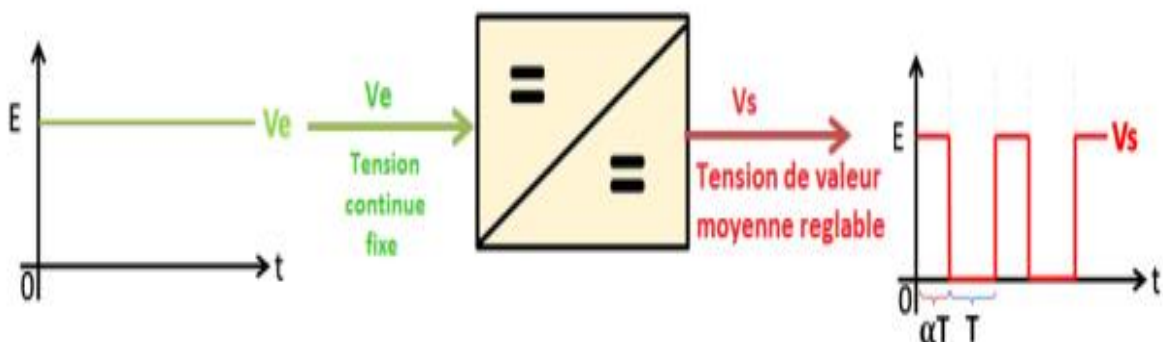


Figure II.2 : Principe de base d'un convertisseur DC-DC

II.3.a. Types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC existent sous différentes topologies, qui sont classées en fonction de leur caractère isolé ou non isolé. [10]

II.3.a.a. Isolés de la source

Les configurations isolées utilisent des transformateurs d'isolement fonctionnant à haute fréquence et sont couramment utilisées dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus couramment utilisées dans la plupart des applications sont le Flyback, le demi-pont et le pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), ces types de topologies sont souvent employés dans les systèmes de couplage avec le réseau électrique lorsque l'isolation électrique est privilégiée pour des raisons de sécurité. [10]

La figure (II.3) représente le schéma du convertisseur Flyback

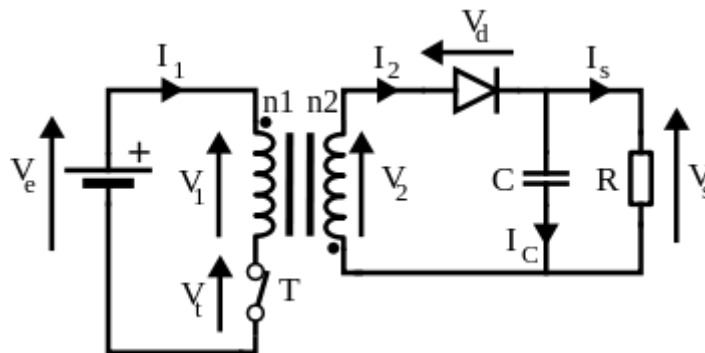


Figure II.3 : Schéma électrique du convertisseur DC-DC Flyback

II.3.a.b. Non isolés de la source

Les configurations non isolées ne font pas usage de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement employées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont divisées en trois catégories distinctes [10]:

- Hacheur élévateur (survolteur) « Boost »

La figure (II.4) montre le schéma du convertisseur Boost.

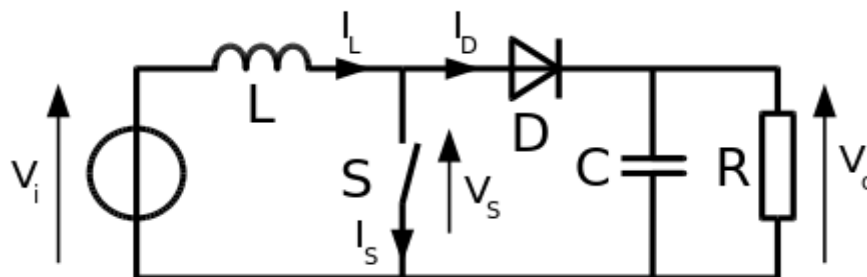


Figure II.4 : Schéma du convertisseur DC-DC Boost

Cette configuration permet d'augmenter la tension d'entrée à une tension de sortie supérieure.

- Hacheur abaisseur (dévolteur) « Buck »

La figure (II.5) montre le schéma du convertisseur Buck.

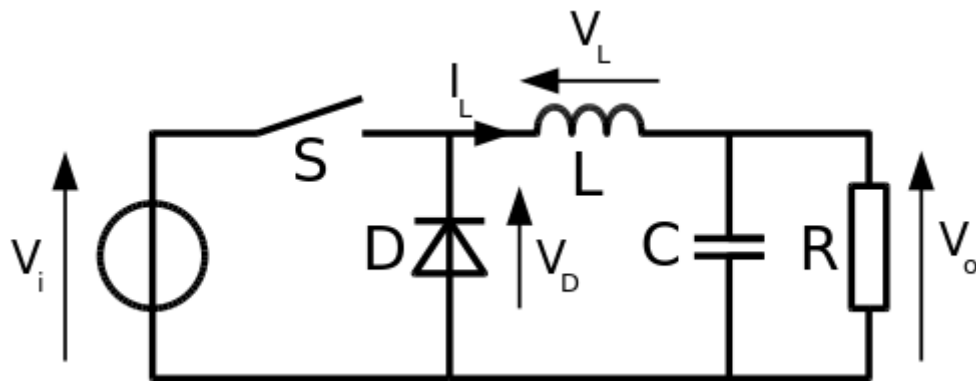


Figure II.5 : Schéma du convertisseur DC-DC Buck

Cette configuration permet de réduire la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure.

- Hacheur abaisseur-élevateur « Buck-Boost »

La figure (II.6) montre le schéma du convertisseur Buck.

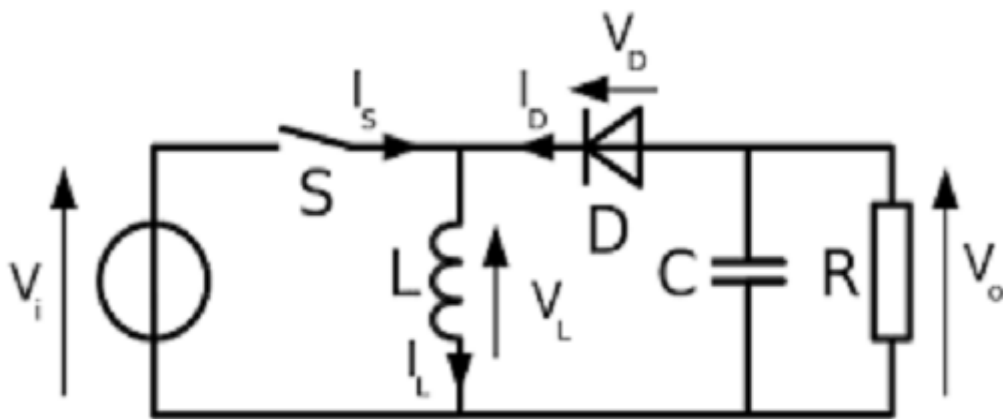


Figure II.6 : Schéma du convertisseur DC-DC Buck-Boost

Cette configuration permet de réguler la tension de sortie en la réduisant ou en l'augmentant par rapport à la tension d'entrée.

➤ Comparaison des montages

À l'exception du convertisseur Buck, tous les autres types de convertisseurs mentionnés peuvent élever la tension. La structure Buck-Boost est élévatrice pour un rapport cyclique supérieur à un demi. En termes de complexité de structure, le Boost est le plus simple. En ce

qui concerne les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes, elles sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices. [5]

La figure (II.7) montre l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

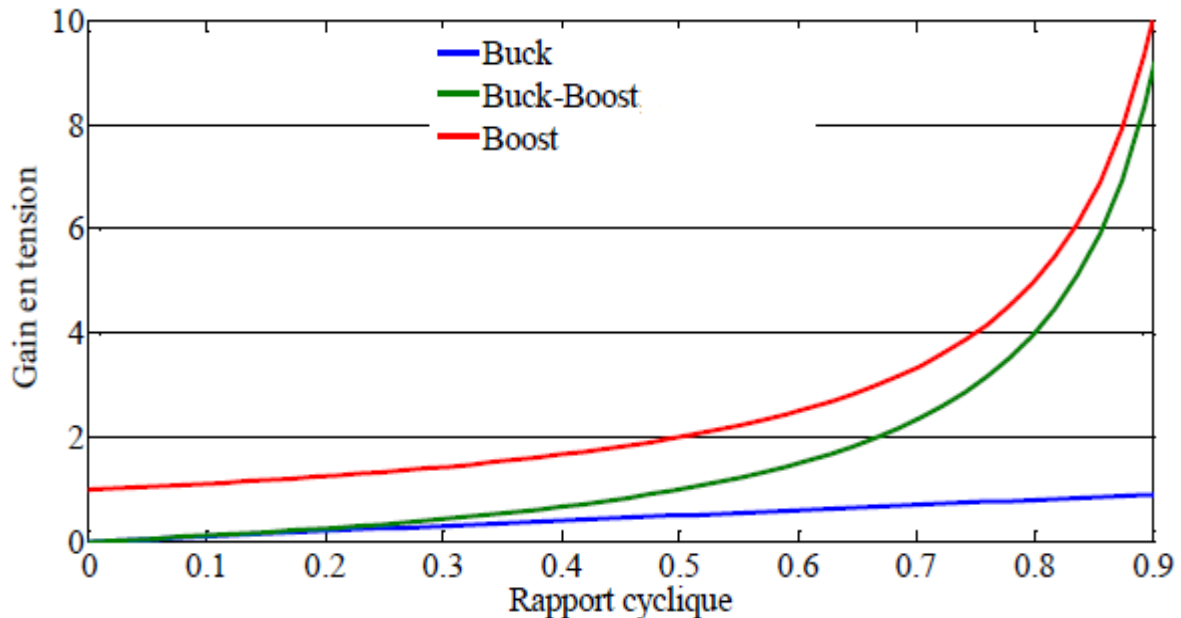


Figure II.7 : Évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs [5]

Parmi les différents types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes solaires photovoltaïques, le hacheur boost joue un rôle crucial dans l'optimisation de l'énergie solaire captée. Les panneaux solaires photovoltaïques génèrent une tension continue basse, souvent inférieure à la tension requise pour alimenter les charges ou injecter l'électricité dans le réseau. Le hacheur boost intervient ici pour élever efficacement la tension du panneau solaire à un niveau supérieur. Ainsi, le hacheur boost permet de convertir la faible tension continue des panneaux solaires en une tension continue plus élevée, adaptée aux besoins du système. Cela présente un avantage significatif en permettant une meilleure utilisation de l'énergie solaire disponible, tout en maintenant l'efficacité de conversion globale du système à un niveau élevé. Grâce à sa conception robuste et à son rendement élevé, le hacheur boost est largement utilisé dans les systèmes solaires photovoltaïques pour maximiser la production d'électricité renouvelable et contribuer à la transition énergétique vers des sources plus propres et durables.

II.3.b. Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, également connu sous le nom de hacheur parallèle, est un dispositif d'alimentation à découpage qui permet d'augmenter la tension fournie et de réduire ainsi le nombre d'éléments requis pour atteindre le niveau de tension souhaité. Par conséquent,

les systèmes de production d'énergie utilisent un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie avant d'atteindre l'étage de l'onduleur. [3]

II.3.b.a. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur :

- **Phase1 (0 < t < αT) :** l'interrupteur S est fermé, le courant dans l'inductance augmente, ce qui entraîne l'accumulation d'énergie sous forme d'énergie magnétique. Pendant cette phase, la diode D est bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation [26], Comme le montre la figure (II.8).

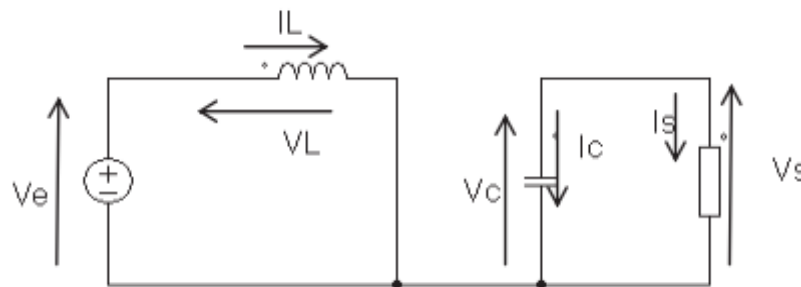


Figure II.8 : Phase d'accumulation de l'énergie

Le condensateur C est supposé préalablement chargé :

$$V_L = V_e = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.2}$$

$$V_C = V_S = R \times I_S \tag{II.3}$$

$$I_S = I_C \tag{II.4}$$

Avec :

V_L : Tension aux bornes de l'inductance

V_e : Tension d'entrée

V_c : Tension aux bornes du condensateur

V_s : Tension de sortie

I_s : Courant de sortie

I_c : Courant aux bornes du condensateur

I_L : Courant aux bornes de l'inductance

- **Phase2 ($\alpha T < t < T$) :** l'interrupteur S est ouvert, l'inductance est en série avec le générateur, ce qui provoque une augmentation de la tension (effet survolteur). Le courant circule alors à travers la diode D, le condensateur C et la charge R, transférant ainsi l'énergie stockée dans l'inductance vers le condensateur [26], Comme le montre la figure (II.9).

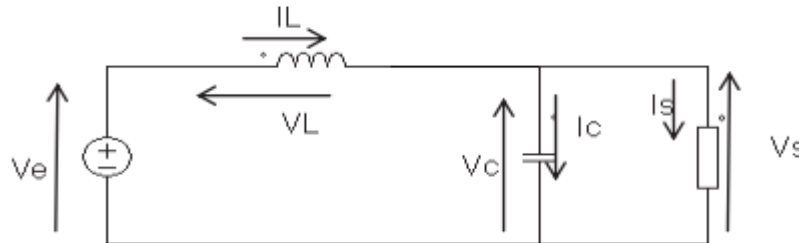


Figure II.9 : Phase de roue libre

$$V_L = -V_C = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.5}$$

$$I_C = I_L - I_S \tag{II.6}$$

➤ **Mode de conduction continue**

Lorsque le convertisseur Boost fonctionne en mode de conduction continue, le courant traversant l'inductance (I_L) ne s'annule jamais [24], Les formes d'ondes du courant et de la tension sont illustrées dans la figure (II.10) suivante.

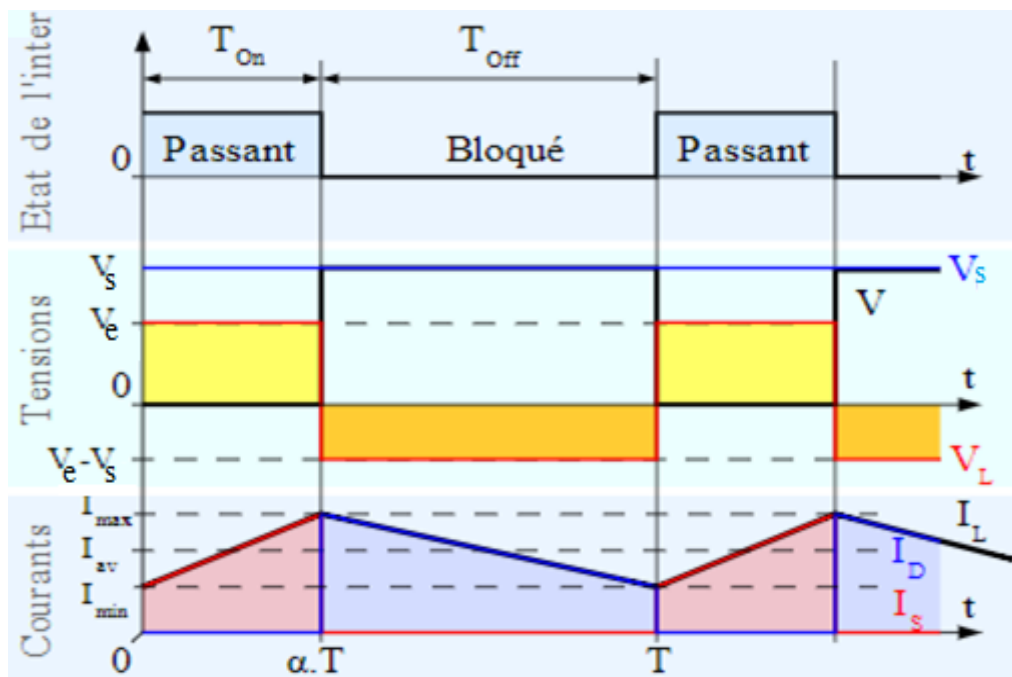


Figure II.10 : Formes d'ondes (courant, tension, état d'interrupteur) du convertisseur Boost en mode conduction continue

La tension de sortie peut être calculée de la manière suivante :

Supposant que les composants sont parfaits,

Pendant l'état passant, lorsque l'interrupteur est fermé, le courant augmente conformément à la relation :

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.7)$$

À la fin de l'état passant, le courant dans l'inductance I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha \times T} dI_L = \int_0^{\alpha \times T} \frac{V_e \times dt}{L} = \frac{V_e \times \alpha \times T}{L} \quad (II.8)$$

α : Rapport cyclique.

Le rapport cyclique α représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S est en état passant. Il varie entre 0 (quand l'interrupteur S ne conduit jamais) et 1 (quand l'interrupteur S conduit en permanence pendant toute la période T).

Pendant l'état bloqué, lorsque l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. En supposant une chute de tension négligeable aux bornes de la diode et un réservoir suffisamment grand pour maintenir une tension constante, l'évolution du courant I_L est la suivante :

$$V_e - V_s = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.9)$$

La variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-\alpha) \times T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha) \times T} \frac{(V_e - V_s) \times dt}{L} = \frac{(V_e - V_s) \times (1 - \alpha) \times T}{L} \quad (II.10)$$

Si l'on suppose que le convertisseur atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance peut être exprimée de la manière suivante :

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (II.11)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance reste constant du début à la fin de chaque cycle de commutation. Cela peut être exprimé de la manière suivante :

$$\Delta I_{L_{On}} + \Delta I_{L_{Off}} = 0 \tag{II.12}$$

On remplace $\Delta I_{L_{On}}$ et $\Delta I_{L_{Off}}$ par leurs expressions :

$$\Delta I_{L_{On}} + \Delta I_{L_{Off}} = \frac{V_e \times \alpha \times T}{L} + \frac{(V_e - V_s) \times (1 - \alpha) \times T}{L} \tag{II.13}$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \tag{II.14}$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur.

➤ **Mode de conduction discontinue**

Dans certains cas, lorsque la demande en énergie de la charge est relativement faible, celle-ci peut être transférée en un temps plus court qu'une période de commutation. Cela se produit lorsque le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période, correspondant à une phase où la diode D ne conduit pas. La principale différence par rapport au principe de fonctionnement décrit précédemment est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle. [24]

Les formes d'ondes sont illustrées dans la figure (II.11) ci-dessous

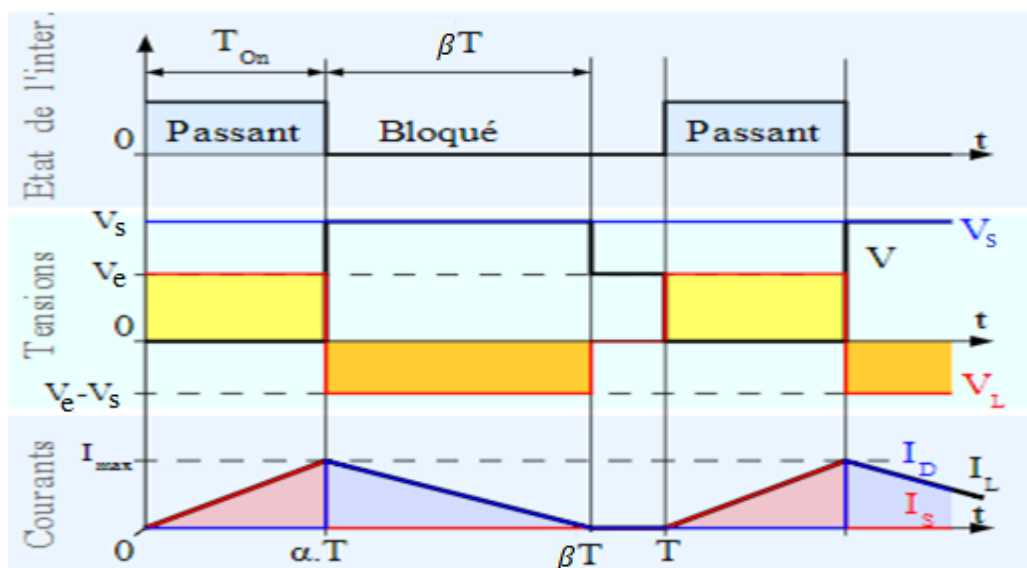


Figure II.11 : Formes d'ondes (courant, tension, état d'interrupteur) du convertisseur Boost en mode conduction discontinue

Bien que la différence entre la conduction continue et discontinue soit faible, elle a un impact significatif sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la manière suivante :

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_e \times \alpha \times T}{L} \quad (II.15)$$

Pendant l'état bloqué, I_L s'annule après T :

$$I_{L_{Max}} + \frac{(V_e - V_s) \times \beta \times T}{L} = 0 \quad (II.16)$$

D'après ses deux équation, β vaut :

$$\beta = \frac{V_e \times \alpha}{V_s - V_e} \quad (II.17)$$

En conséquence, l'expression du courant traversant la diode peut être formulée de la manière suivante :

$$I_s = \bar{I}_D = \frac{I_{L_{Max}}}{2} \times \beta \quad (II.18)$$

En remplaçant I_L max et β par leurs expressions respectives, on obtient :

$$I_s = \frac{V_e \times \alpha \times T}{2 \times L} \times \frac{V_e \times \alpha}{V_s - V_e} = \frac{V_e^2 \times \alpha^2 \times T}{2 \times L \times (V_s - V_e)} \quad (II.19)$$

Ce qui donne :

$$\frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{V_e \times \alpha^2 \times T}{2 \times L \times I_s} \quad (II.20)$$

Dans ce régime de fonctionnement, la tension de sortie est donc dépendante de la charge pour un rapport cyclique fixe.

Ceci implique qu'en conduction discontinue, il est nécessaire de mettre en œuvre une boucle de régulation.

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost sont décrites par la figure (II.12) suivante.

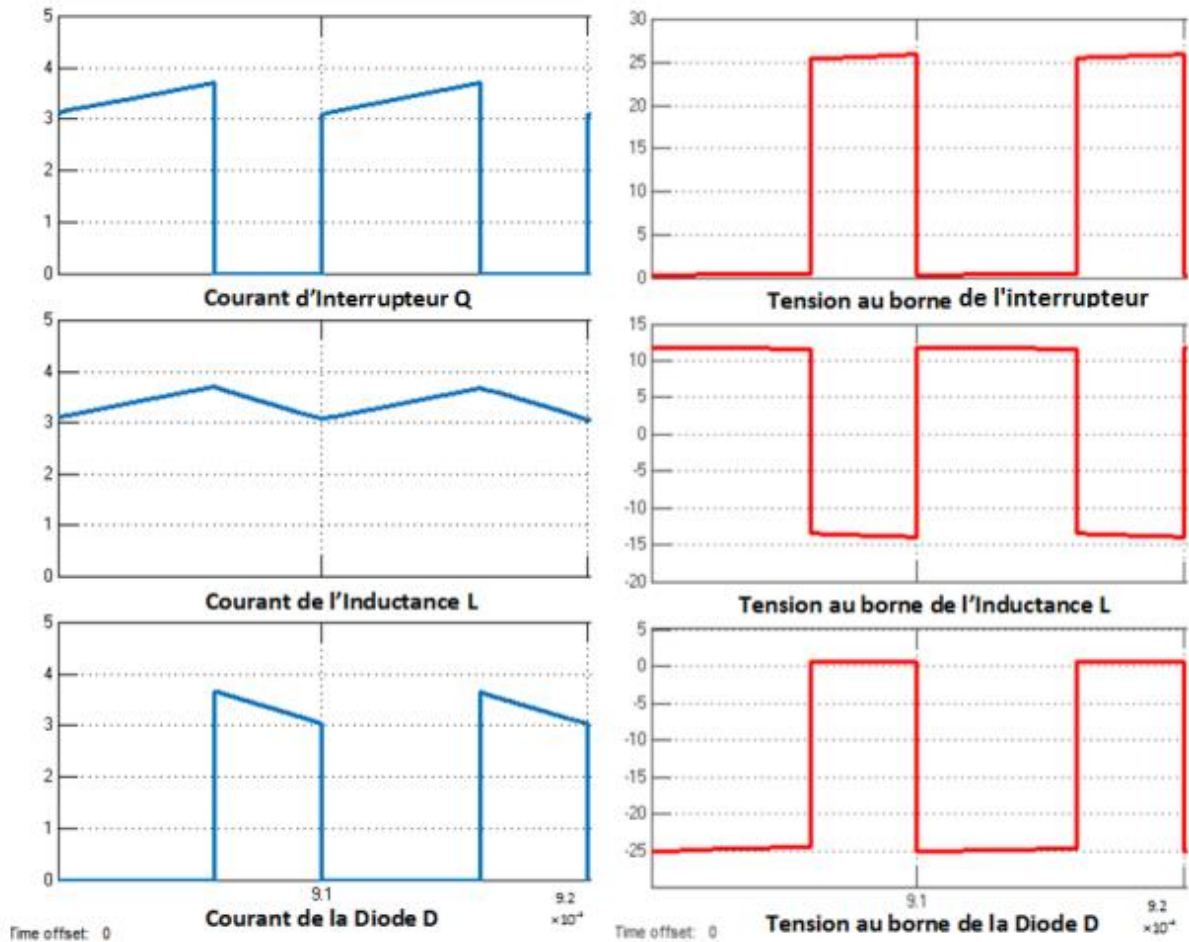


Figure II.12 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost

II.3.c. Puissance des convertisseurs

II.3.c.a. Définition

Supposons qu'il y ait un convertisseur statique connecté à un récepteur. Nous utiliserons la convention "générateur" pour désigner le convertisseur et la convention "récepteur" pour désigner le récepteur. [24]

La figure (II.113) représente un schéma du couplage d'un convertisseur avec un récepteur

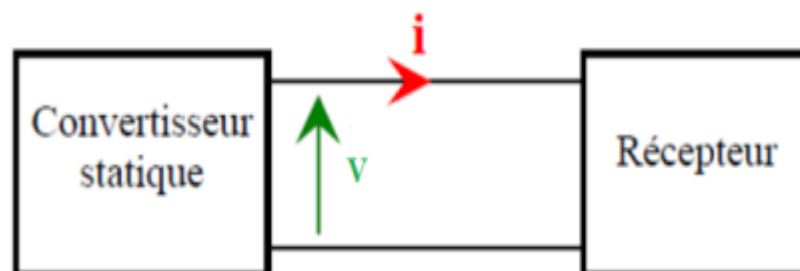


Figure II.13 : Couplage du convertisseur avec un récepteur

II.3.c.b. Puissance instantanée

Tout comme en régime continu, la puissance instantanée est définie par le produit du courant et de la tension. En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$P(t) = V(t) \times i(t) \quad (II.21)$$

II.3.c.c. Puissance active

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$

$$P(t) = P_{moyenne} = \langle V(t) \times i(t) \rangle \quad (II.22)$$

Ce n'est que dans le cas d'un régime sinusoïdal alternatif que l'on observe :

$$P(t) = V \times I \times \cos \varphi \quad (II.23)$$

II.3.c.d. Puissance apparente

La puissance apparente S est le résultat de la multiplication de la valeur efficace de la tension (V_{eff}) par la valeur efficace de l'intensité (I_{eff}). Elle est une grandeur théorique utilisée pour déterminer la capacité des générateurs.

$$S = V \times I \quad (II.24)$$

II.3.c.e. Facteur de puissance

Afin d'analyser ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k < 1$) pour l'évaluer

$$k = \frac{V(t) \times i(t)}{V_{eff} \times I_{eff}} \quad (II.25)$$

Soit $k = \frac{P}{S}$

$$k = \cos \varphi \quad (II.26)$$

II.4. Connexion directe source-charge

Actuellement, il existe encore de nombreuses applications qui impliquent une connexion directe entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge. Ce choix est principalement motivé par la simplicité de l'opération et le degré élevé de fiabilité, principalement dû à l'absence d'électronique, sans oublier le faible coût associé. La figure (II.14) illustre ce scénario. Cependant, si cette charge était une batterie, lorsqu'il n'y a pas de lumière incidente sur le module, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, ce qui entraînerait une décharge de la batterie vers le générateur photovoltaïque et potentiellement des dommages irréversibles. Par conséquent, afin d'éviter cette situation, il est nécessaire d'utiliser une diode anti-retour placée

entre le GPV et la charge pour assurer une connexion appropriée. Cette configuration est représentée dans la figure (II.14). Cependant, l'inconvénient de cette configuration est qu'elle ne permet aucune limitation ou réglage de la tension de la batterie. De plus, le transfert de la puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas garanti. [27]

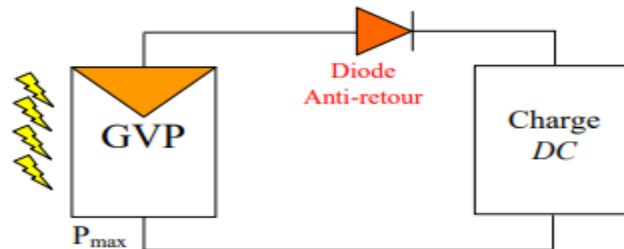


Figure II.14 : Connexion directe GPV-charge DC par le biais d'une diode anti-retour

II.4.a. Schéma synoptique du système PV adapté

La figure (II.15) illustre le schéma synoptique de l'adaptation DC-DC du générateur photovoltaïque à une charge résistive. L'ensemble est composé des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un quadripôle constitué d'un convertisseur d'énergie de type survolteur (Boost) pour les applications nécessitant des tensions supérieures à 17V. Ce convertisseur d'énergie comprend des condensateurs, des inductances et des interrupteurs. Idéalement, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance et présentent des rendements élevés. L'interrupteur est réalisé à l'aide d'un dispositif à semi-conducteur en commutation, généralement un transistor MOSFET à faible temps de commutation pour minimiser les pertes de puissance.
- Une commande du convertisseur qui génère un signal carré avec une fréquence spécifique et un rapport cyclique variable α . [23]

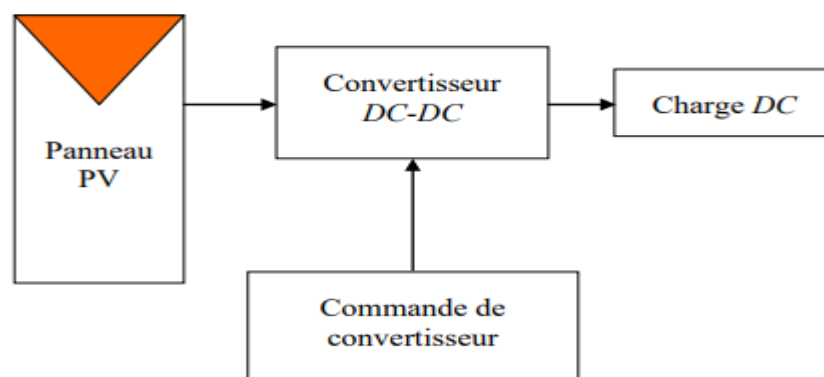


Figure II.15 : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur)

II.4.b. Structure du système PV avec l'adaptation du convertisseur Boost

Le système PV est représenté sur la figure (II.16) dont l'adaptation entre le générateur et la charge résistive est réalisé par convertisseur DC-DC élévateur (Boost).

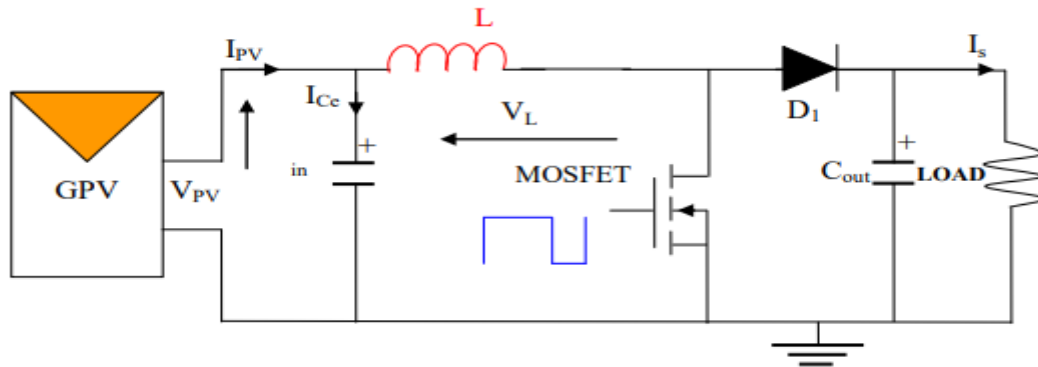


Figure II.16 : Système PV formé par un générateur PV, convertisseur DC-DC élévateur et la charge résistive

II.5. Commande MPPT des convertisseurs DC-DC

Il existe des lois de commande spécifiques conçues pour permettre aux dispositifs de fonctionner à leurs performances maximales, même si ces points de performance ne sont pas connus à l'avance, ni le moment où ils ont été modifiés, ni les raisons de ces modifications. Dans le cas des sources d'énergie, cela se traduit par la recherche des points de puissance maximale. Ce type de commande est souvent appelé "Recherche du Point de Puissance Maximum" (MPPT). Le principe de ces commandes consiste à rechercher le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge, afin de transférer la puissance maximale possible. [28]

Dans la figure (II.17), on peut observer le schéma général d'un système photovoltaïque comprenant un module MPPT.

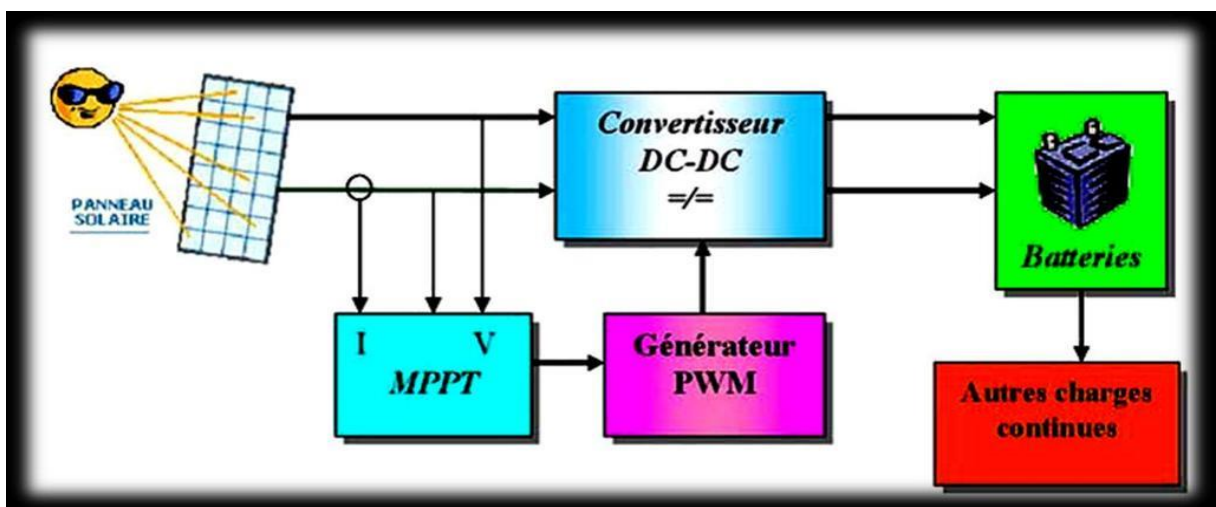


Figure II.17 : Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT

Ces approches reposent sur l'utilisation d'algorithmes de recherche itérative afin de déterminer le point de fonctionnement optimal du module solaire, permettant ainsi de maximiser la puissance générée sans interruption du système. [28]

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{PV} = V_{PV} \times I_{PV}$

II.5.a. Principe de la commande MPPT

La commande MPPT, combinée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet d'exploiter un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à toujours produire sa puissance maximale. Indépendamment des conditions météorologiques telles que la température et l'ensoleillement, la commande du convertisseur positionne le système au point de fonctionnement optimal (VPPM et IPPM). Pour optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque, un convertisseur statique (CS) est utilisé et contrôlé par une commande MPPT. [29]

La commande MPPT ajuste le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié afin d'exploiter au maximum la puissance fournie par le GPV. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins complexe selon la méthode utilisée pour trouver le MPP (Maximum Power Point). En général, il repose sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée tels que le courant (I) et la tension (V), et par conséquent de la puissance du GPV, jusqu'à atteindre le MPP. [29]

La figure (II.18) représente le principe de la commande MPPT

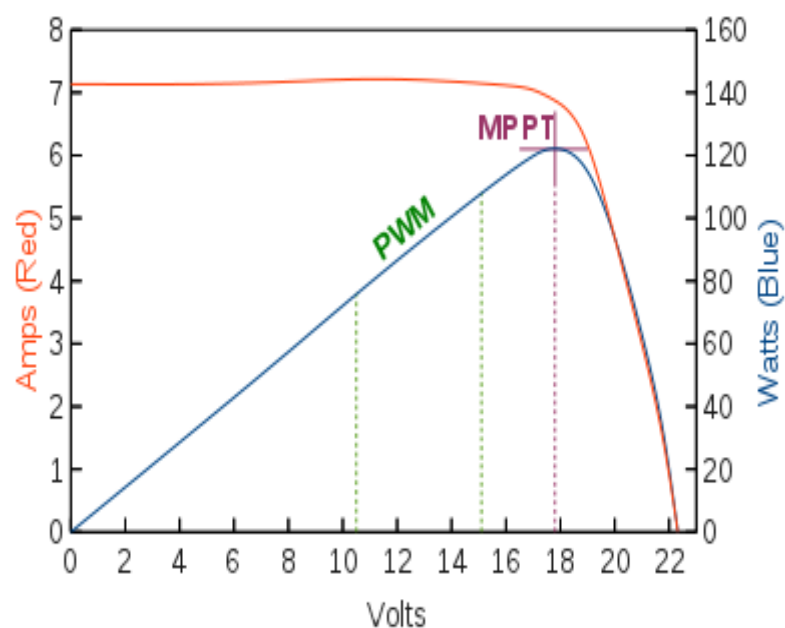


Figure II.18 : Principe de la commande MPPT

II.5.b. Classification des commandes MPPT

De manière générale, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction de leur implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Cependant, il est plus pertinent de les classer en fonction du type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée qu'elles utilisent. [12]

II.5.b.a. Classification des commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée

Il existe plusieurs méthodes de commande MPPT qui recherchent le PPM en se basant sur l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Par exemple, la méthode Perturb&Observe et les algorithmes d'incrément de conductance utilisent la puissance fournie par le GPV pour appliquer une action de contrôle appropriée afin de suivre le PPM. Il y a aussi des commandes basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux du PPM (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Certains MPPT sont inspirés par les réseaux de neurones, où soit des systèmes avec une mémoire informatique importante stockent tous les cas possibles, soit les commandes sont approximatives. Ces différentes commandes ont en commun leur précision et leur réactivité. [28]

II.5.b.b. Classification des commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie

La littérature propose également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques (CS). Par exemple, les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées lorsque la charge est une batterie. Dans tous les systèmes qui utilisent les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est réalisée à partir de l'efficacité du convertisseur. En général, plus la qualité de l'étage de conversion est élevée, plus cette approximation est valide. Cependant, en règle générale, les systèmes avec un seul capteur sont intrinsèquement moins précis. La plupart de ces systèmes ont été initialement conçus pour une utilisation dans le domaine spatial. [28]

II.5.b.c. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

➤ MPPT indirect

Ce type de commande MPPT exploite la relation existante entre les variables mesurées (I_{CC} courant de court-circuit ou V_{OC} tension en circuit ouvert), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il existe également des commandes qui utilisent une estimation du point de fonctionnement du GPV basée sur un modèle paramétrique

préalablement défini. Par ailleurs, il y a des commandes qui se concentrent sur le suivi de la tension optimale en tenant compte uniquement des variations de température des cellules, mesurées à l'aide d'un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre et sont généralement destinées à des systèmes peu coûteux et moins précis, fonctionnant dans des régions où les changements climatiques sont minimes. [30]

➤ MPPT direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) en utilisant les mesures de courant, de tension ou de puissance dans le système. Ainsi, il peut réagir aux changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces méthodes reposent sur des algorithmes de recherche qui permettent de déterminer le maximum de la courbe de puissance sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée à intervalles réguliers. Si la puissance de sortie augmente, la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle est inversée. Le point de fonctionnement réel oscille ainsi autour du MPP. D'autres algorithmes sont utilisés pour prévenir les erreurs d'interprétation qui peuvent survenir, par exemple, en cas de mauvaise direction de recherche due à une augmentation rapide du rayonnement. La détermination de la puissance du générateur PV, essentielle pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que leur multiplication. Certains algorithmes introduisent des variations sinusoïdales en petits signaux sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et continue de la tension du GPV, afin de rapprocher au maximum le point de fonctionnement du GPV du MPP. L'avantage de ces types de commandes réside dans leur précision et leur réactivité. [30]

II.5.c. Les algorithmes MPPT

Différents principes de fonctionnement des commandes MPPT, basés sur les propriétés du GPV, sont disponibles, offrant des niveaux de performance variables. [28]

II.5.c.a. Méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est largement utilisée en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (augmentation ou diminution) de la tension V_{ref} ou du courant I_{ref} , et sur l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P = VI$). Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui subit peu de variations lors des changements climatiques. Le rayonnement solaire a un impact plus important sur le courant photovoltaïque que sur la tension. En revanche,

la température a une influence plus significative sur la tension du GPV. Toutefois, la dynamique de la température est lente et varie dans une plage limitée. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. [28]

Le principe de commande P&O repose sur l'application d'une perturbation de faible amplitude à la tension P_{PV} , ce qui entraîne une variation de la puissance. La figure (II.19) envisage quatre scénarios de situation pour P&O, lesquels sont résumés dans le tableau (II.1).

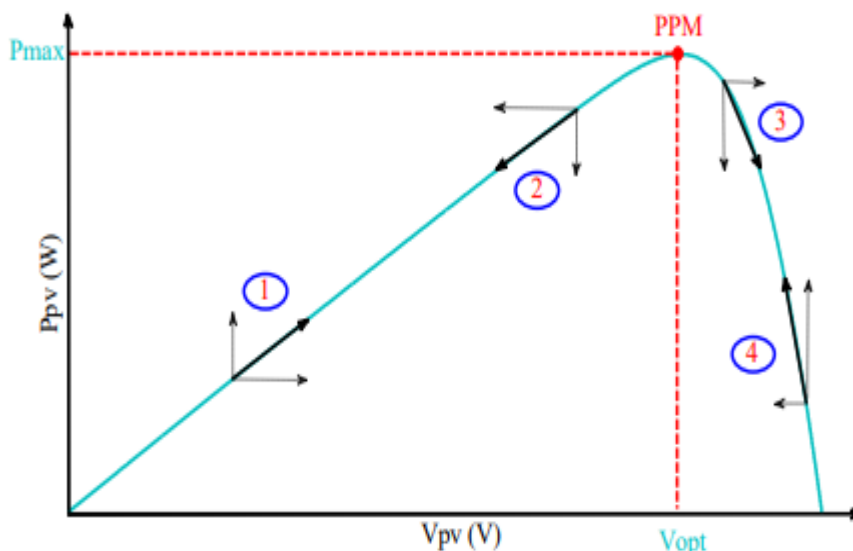


Figure II.19 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O [28]

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	$V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	$V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

Tableau II.1 : Principe de l'algorithme P&O [28]

En analysant les effets d'une variation de tension sur la caractéristique P(V), il devient facile de déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au MPP et de le faire converger vers le maximum de puissance en utilisant une commande appropriée. Pour ce type de commande, il est nécessaire d'avoir deux capteurs (courant et tension du GPV) pour mesurer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus adaptée pour mettre en œuvre la méthode P&O, bien que des circuits analogiques puissent également être utilisés. [28]

La figure (II.20) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, ou l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

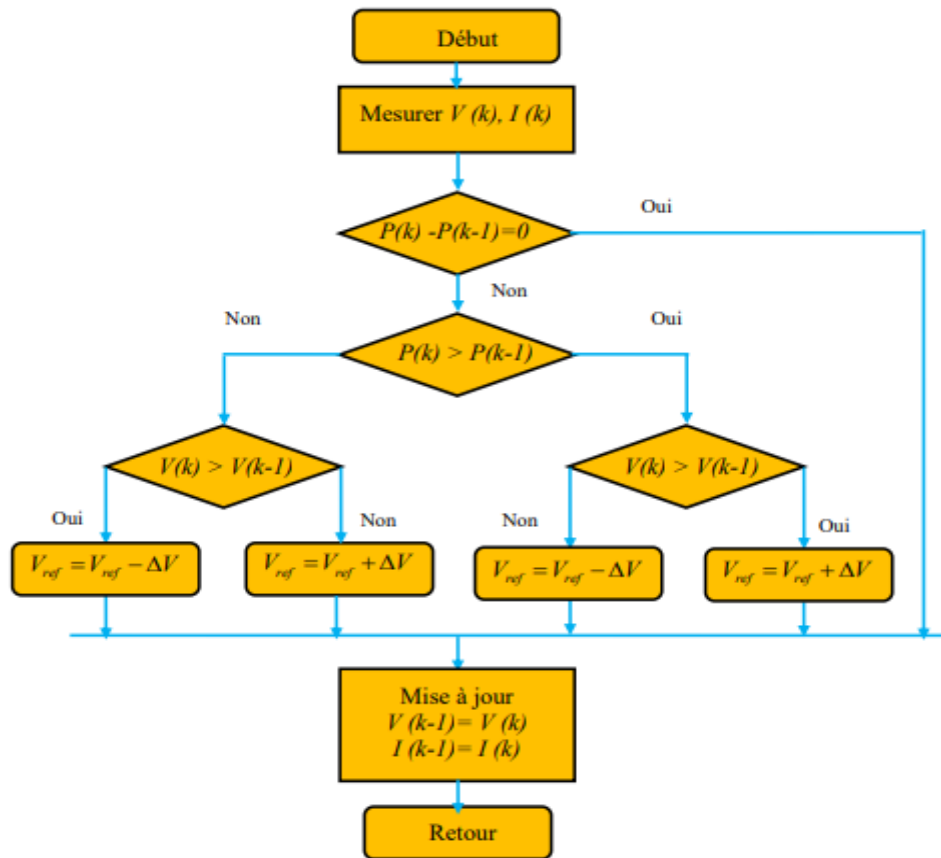


Figure II.20 : Algorithme de P&O classique

II.5.c.b. Méthode incrémentation des conductances (IncCond)

Cette technique repose sur la variation de la conductance du GPV et son impact sur la position du point de fonctionnement. La conductance du module photovoltaïque ainsi que son incrément, qui représente la variation élémentaire de la conductance, sont définis comme suit :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (II.27)$$

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (II.28)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0$; le point de fonctionnement est à droite du PPM.

La dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \times I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} \times \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (II.29)$$

On peut donc avoir d'autres conditions sur la variation de la conductance :

- Si $I_{PV} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ et $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $I_{PV} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ et $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $I_{PV} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ et $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

Le PPM peut être atteint en comparant constamment la valeur de la conductance ($\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$) [8], L'algorithme de cette méthode est illustré dans la Figure (II.21), où V_{ref} représente la tension de référence. On peut observer que la puissance est proportionnelle à la conductance.

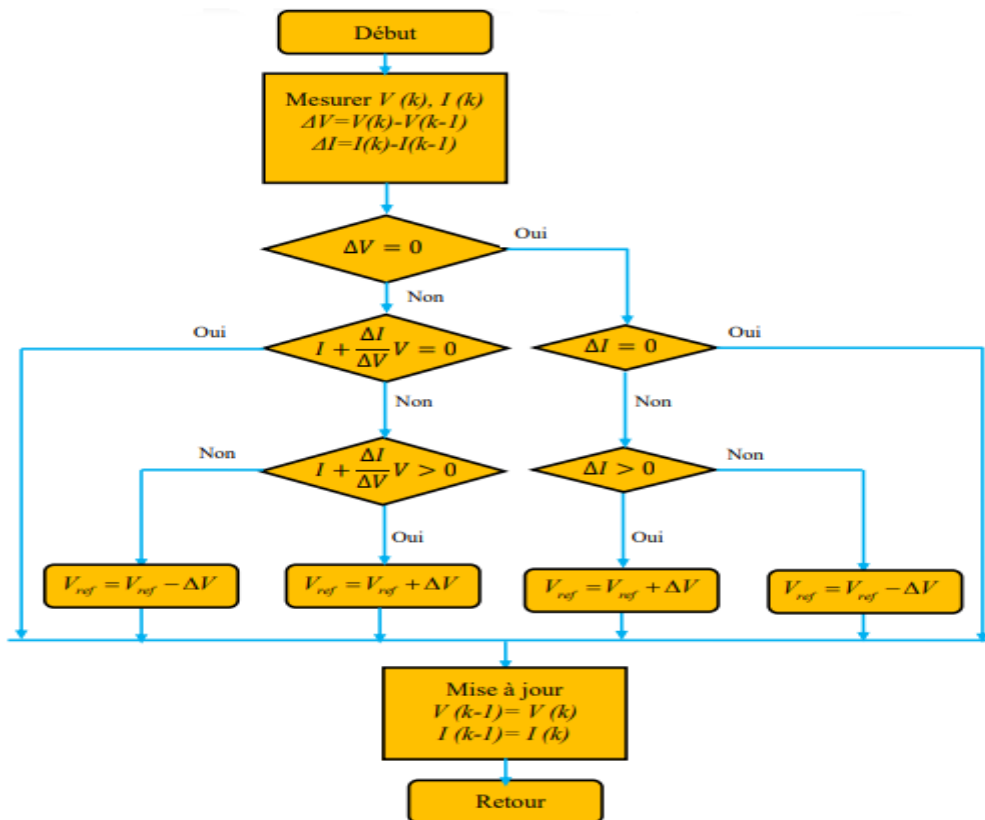


Figure II.21 : Algorithme de la méthode Incrément de conductance

En pratique, similairement à la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de satisfaire pleinement la condition $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$, ce qui signifie que le système continue constamment à la rechercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui de P&O, ce qui entraîne un temps d'exécution plus long. [28]

II.5.c.c. Méthode de la logique floue

La mise en œuvre de la commande logique floue (Fuzzy Logic Control) se fait en trois étapes: la fuzzification, la lecture de la table de vérité et la défuzzification. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et la variable de sortie est la variation du rapport cyclique $\Delta\alpha$. En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur E et le changement d'erreur ΔE sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit [7]:

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (II.30)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (II.31)$$

La figure (II.22) représente la structure de base de la commande MPPT par la logique floue.

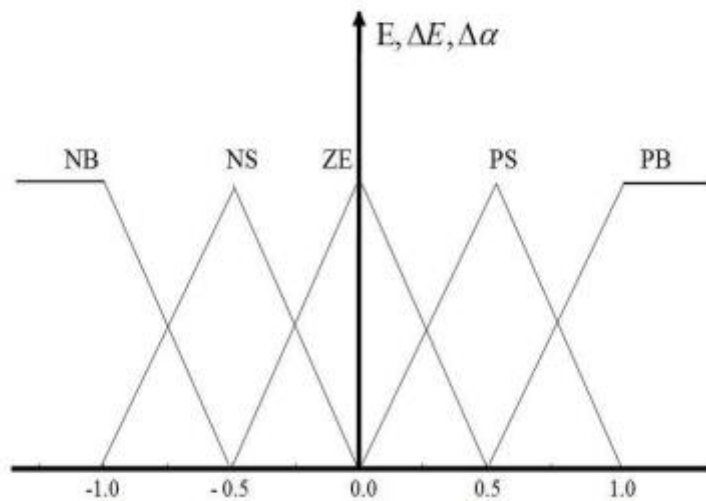


Figure II.22 : Structure de base de la commande floue [7]

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre les cinq valeurs suivantes (Figure 2.20): NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big). Il existe des commandes qui ajoutent aux valeurs précédentes deux autres valeurs qui sont : NM (Negative Means) et PM (Positive Means). [7]

En fonction de leurs évolutions et d’une table de vérité comme indiquée dans le tableau (II.2), une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta\alpha$.

$E \backslash \Delta E$	NB	ZS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
ZS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau II.2 : Exemple d’une table de règles pour une commande logique floue [7]

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d’entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d’après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s’approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s’affinent jusqu’à atteindre le PPM. La défuzzification, consiste à convertir la variable de sortie $\Delta\alpha$ d’une variable linguistique en une variable numérique. [7]

L’avantage de ces techniques est qu’elles peuvent fonctionner avec des valeurs d’entrées peu précises et qu’elles n’ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non-linéarités. [7]

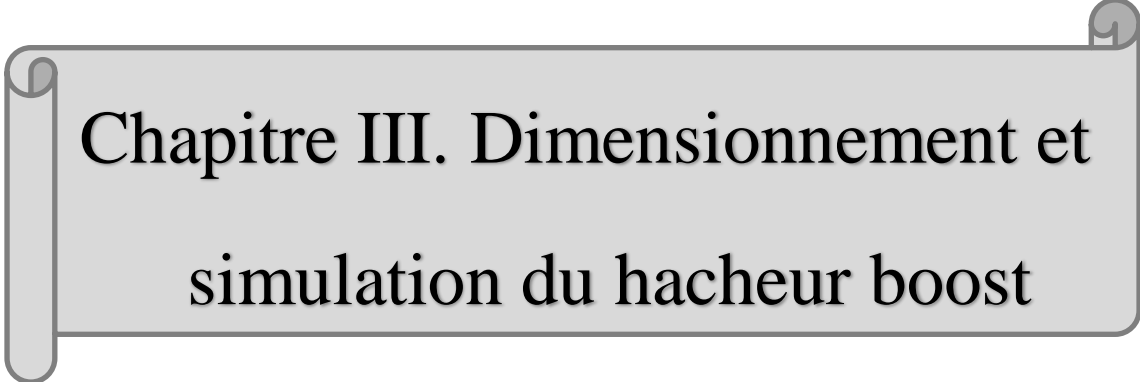
II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré les convertisseurs DC-DC (hacheur), leur définition et les différents types disponibles. Nous nous sommes particulièrement intéressés au hacheur Boost et à son utilisation dans les systèmes photovoltaïques (PV).

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques en permettant une conversion efficace de l’énergie électrique générée par les panneaux solaires. Ils permettent de réguler la tension et le courant en fonction des exigences spécifiques du système, garantissant ainsi un fonctionnement optimal.

Ensuite, nous avons rappelés le concept de la recherche du point de puissance maximale (MPPT en Anglais) et nous avons décrit les différentes méthodes (algorithmes) à savoir "P&O", "IncCond" et "la logique floue".

Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur la simulation du hacheur Boost en adaptation avec le générateur photovoltaïque et l'interprétation des résultats obtenus.



Chapitre III. Dimensionnement et simulation du hacheur boost

Chapitre III. Dimensionnement et simulation du hacheur Boost

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque pour prédire son comportement dans des conditions naturelles. Le système envisagé se compose d'un module photovoltaïque, d'un convertisseur élévateur (DC-DC) et d'une charge résistive. La commande du convertisseur élévateur est assurée par une technique de maximisation de puissance (MPPT), également connue sous le nom de "maximum power point tracking" en anglais. Pour cette étude, nous avons choisi la méthode la plus simple et la plus couramment utilisée pour la maximisation de la puissance, la méthode perturber et observer (P&O). À travers ce chapitre, nous explorerons en profondeur les facteurs qui influencent la valeur de la tension et du courant de sortie, en mettant l'accent sur les composants clés (inductance, capacité) impliqués dans le fonctionnement du hacheur. Cette analyse approfondie sera essentielle pour maximiser l'efficacité et la stabilité du hacheur.

La figure (III.1) représente le schéma synoptique de conversion d'énergie solaire avec une commande MPPT.

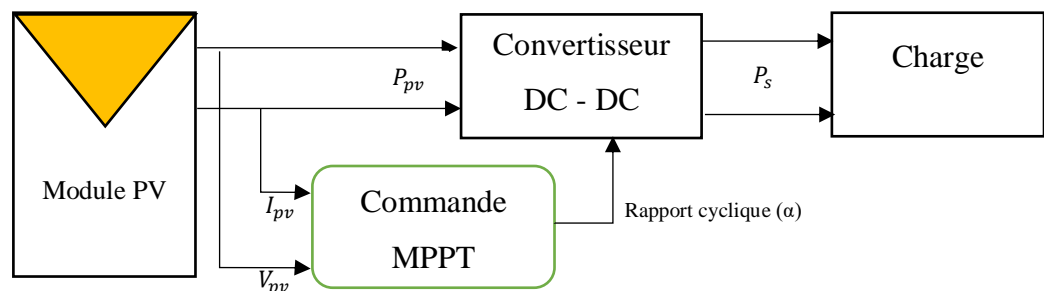


Figure III.1 : Schéma synoptique de conversion d'énergie photovoltaïque avec une commande MPPT.

III.2. Module photovoltaïque

La connexion entre les panneaux photovoltaïques est une étape essentielle dans la mise en place d'un système solaire. Elle permet de relier plusieurs panneaux solaires entre eux pour former un réseau électrique cohérent. [14]

La connexion des panneaux peut se faire de deux manières principales : en série ou en parallèle.

III.2.a. Connexion en série

La connexion en série consiste à connecter la borne positive d'un panneau solaire à la borne négative du panneau suivant, et ainsi de suite, formant ainsi une chaîne continue. Cette

configuration permet d'ajouter les tensions individuelles des panneaux solaires, ce qui entraîne une tension totale plus élevée à la sortie. Cela peut être avantageux lorsque vous avez besoin d'une tension plus élevée pour alimenter des appareils ou chargeur de batteries nécessitant une tension spécifique. [19]

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \dots \quad (III.1)$$

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 \dots \quad (III.2)$$

III.2.b. Connexion en parallèle

La connexion en parallèle, quant à elle, implique de connecter toutes les bornes positives des panneaux ensemble et toutes les bornes négatives ensemble. Cette configuration permet d'ajouter les courants individuels des panneaux solaires, ce qui augmente la capacité de courant disponible. Cela peut être bénéfique lorsque on a besoin d'une plus grande capacité de courant pour alimenter des charges qui demandent une intensité élevée. [19]

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 \dots \quad (III.3)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \dots \quad (III.4)$$

III.2.c. Caractéristiques du panneau solaire utilisé

Dans le cadre de notre étude des panneaux solaire de type « Soltech 1sth-215-P » sont utilisés. Les caractéristiques de ce module photovoltaïque sous les conditions STC (Standard Test Conditions) pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C , sont représentée dans le tableau (III.1) qui a été extrait de Matlab.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximal P_{max}	213.15W
Tension en circuit ouvert V_{co}	36.3V
Tension au point de puissance maximal $V_{P_{max}}$	29V
Courant en court-circuit I_{cc}	7.84A
Courant en point de puissance maximal $I_{P_{max}}$	7.35A

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

III.2.d. Dimensionnement et simulation des panneaux photovoltaïques

Pour obtenir une puissance totale de 1000 W à partir de plusieurs panneaux solaires, il est nécessaire d'additionner les puissances individuelles de tous les panneaux. Cependant, pour

maintenir une tension constante, une connexion en parallèle entre les panneaux solaires est nécessaire. [31]

- Le nombre total nécessaire est : $n \geq \frac{P_t}{P} = \frac{1000}{213.15} = 4.69$, 5 panneaux photo voltaïques sont nécessaires.
- La puissance totale : $P_{pv} = n \times P_{max} = 5 \times 213.15 = 1065.75W$
- La tension totale est : $V_{pv} = V_1 = V_2 = V_3 \dots = 29V$
- Le courant total est : $I_{pv} = n \times I_{P_{max}} = 7.35 \times 5 = 36.75A$

La figure (III.2) représente le schéma de simulation du module photovoltaïque.

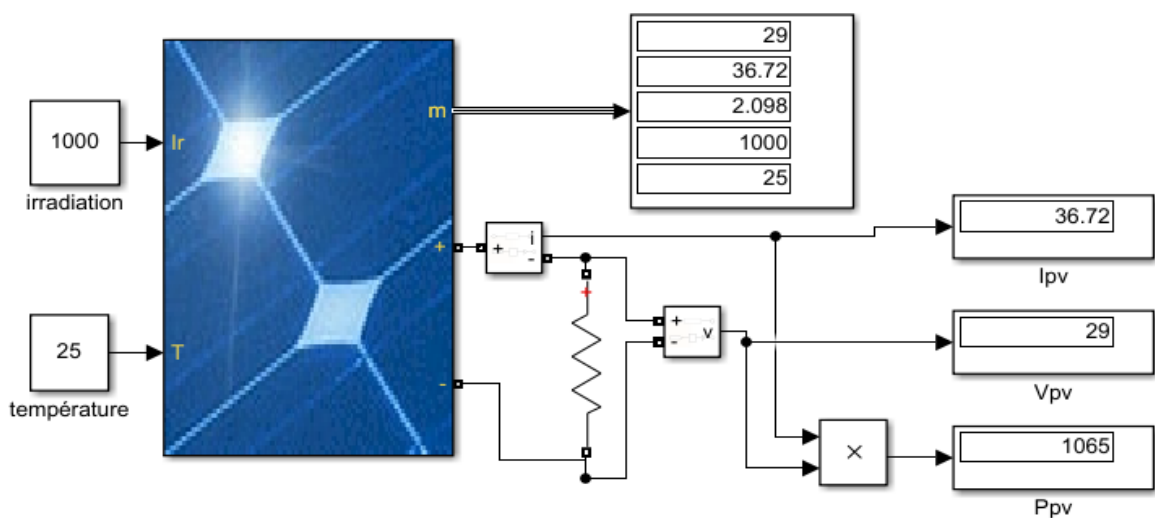


Figure III.2 : Schéma bloc du module photovoltaïque.

La figure (III.3) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension.

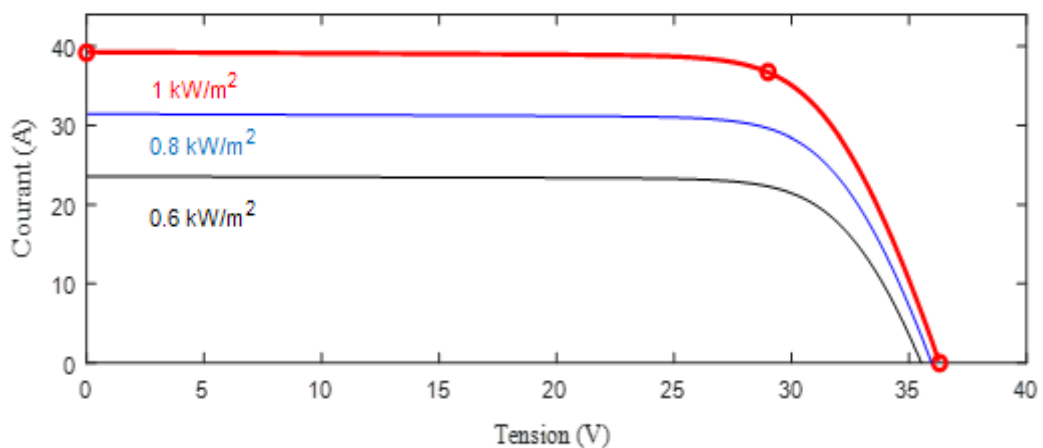


Figure III.3 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

La figure (III.4) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension.

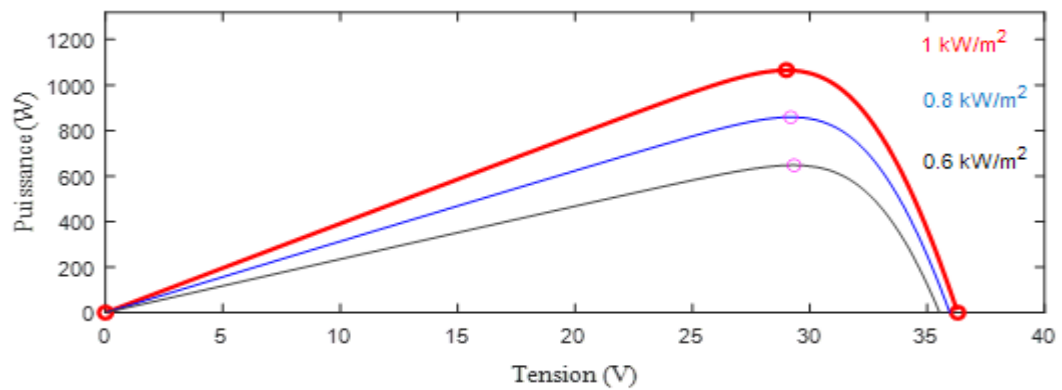


Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension

La figure (III.5) représente l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension.

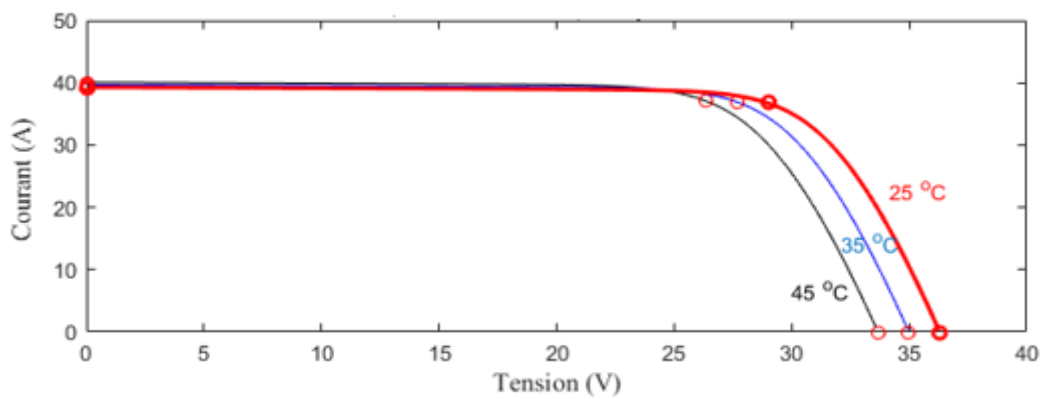


Figure III.5 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

La figure (III.6) représente l'influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.

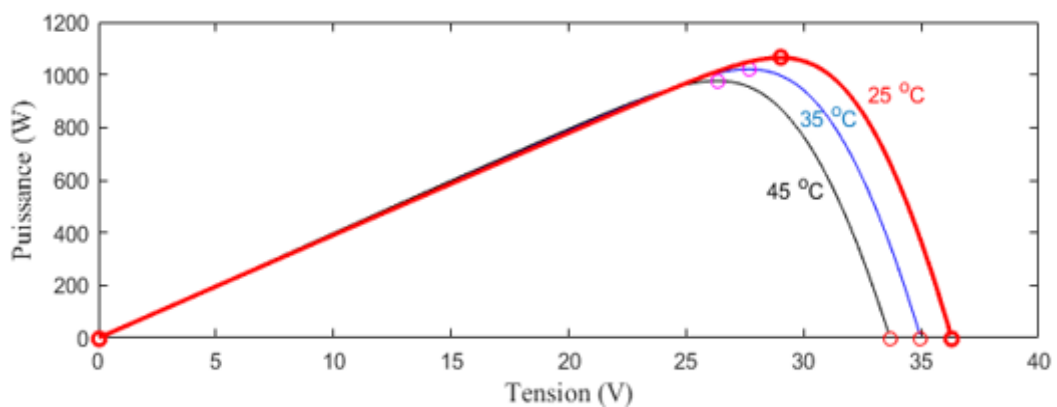


Figure III.6 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension

III.3. Dimensionnement des composants L et C du hacheur Boost

Afin de déterminer les valeurs des composants du hacheur, nous avons procédé à une large étude sur les valeurs de la tension de sortie (V_s). [31]

La tension d'entrée de cet hacheur est imposée par un panneau solaire de type (Soltech 1sth-215-P), avec :

$$\text{➤ } V_{pv_{mp}} = 29V$$

$$\text{➤ } P_{max} = 1065W \text{ Pour un ensoleillement} = 1000W/m^2 \text{ à une température de } 25^\circ$$

La valeur de la fréquence choisie est :

$$f = 5KHz$$

La valeur du rapport cyclique α est donné par la relation suivante [31]:

$$\alpha_{max} = 1 - \frac{V_{pv_{mp}}}{V_s} \quad (III.5)$$

Le dimensionnement de l'inductance L, à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide de l'inéquation suivante [31]:

$$L \geq \frac{V_s \times \alpha}{f \times \Delta I_L} \quad (III.6)$$

Avec :

$$\Delta I_L = 0.1 \times I_{pv_{mp}} \quad (III.7)$$

Le dimensionnement du condensateur C, à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante [31]:

$$C \geq \frac{\alpha_{max} \times P_{max}}{f \times \Delta V_s} \quad (III.8)$$

Avec :

$$\Delta V_s = 0.01 \times V_s \quad (III.9)$$

La résistance minimale de la charge pour une puissance de sortie maximal est variable lors du changement de la tension de sortie d'où :

$$R_{min} = \frac{V_s^2}{P_{s_{max}}} \quad (III.10)$$

Les valeurs calculer et normalisé de l'inductance, capacité, résistance pour des tensions de sortie $V_s = [58 \dots 230]$, sont exposés dans le tableau (III.2).

$V_s [V]$	58	100	130	230
α_{max}	0.5	0.71	0.77	0.87
$C_{cat} [\mu F]$	3165	1512	970	350
$C_{nor} [\mu F]$	3300	2200	1000	470
$L_{cat} [mH]$	1.6	3.9	5.5	10.9
$R_{min} [\Omega]$	3.36	10	16.9	52.9

Tableau III.2 : Valeurs critiques minimaux calculées et normalisées des composants du hacheur

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- La valeur de l'inductance augmente proportionnellement à la tension de sortie.
- Tant dit que la valeur de la capacité diminue inversement à la tension de sortie.

III.3.a. Le choix des composant

L'inductance joue un rôle important dans la régulation du courant qui circule dans le circuit. Elle s'oppose aux variations rapides du courant, en stockant l'énergie électrique sous forme de champ magnétique. Cela permet de lisser le courant et de réduire les fluctuations potentiellement indésirables. Tandis que la capacité agit comme un filtre en lissant les variations de tension et de maintenir une tension de sortie plus stable.

Afin de réaliser notre hacheur élévateur robuste, avec des tensions de sortie variante de 58v jusqu'à 230v, on choisira les valeurs maximales calculées pour la capacité et l'inductance :

- $L=10.9mH$
- $C=3300\mu F$ 250v

Cette combinaison de l'inductance L et de la capacité C respecte parfaitement la condition suivante $f_0 < f/10$.

Sachant que :

$$f_0 = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}} \quad (III.11)$$

$$f_0 = 26.54 Hz < 500 Hz$$

III.3.b. Calcul de nombre de tours

On a :

$$L = N^2 \times A_L \quad (III.12)$$

Avec :

L : inductance [mH]

N : nombre de tours

A_L : inductance du tore par tours carrés en nH/tr²

Le logiciel « coil64 v2.1.27 » est utilisé afin de calculer la longueur du fil à utilisé ainsi le nombre de spires en lui introduisant les paramètres de notre tore. Comme illustrée dans la figure (III.7) suivante.

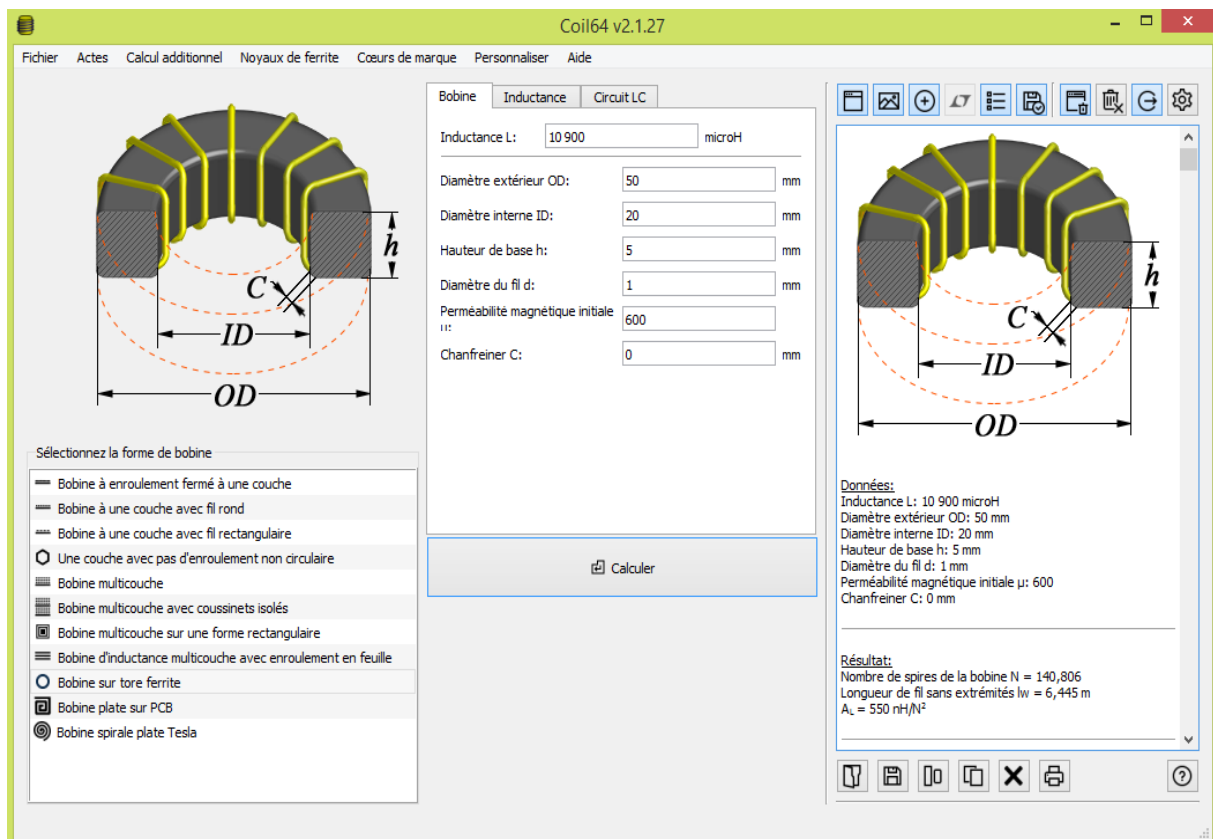


Figure III.7 : Logiciel utilisé pour calculer la longueur et nombre de spire pour notre bobine

Pour L=10.9mH :

- $A_L = 550 \text{ nH/N}^2$
- Longueur du fil = 6.445m
- N = 140 tours

Nous détaillerons notre approche de simulation à l'aide du logiciel Matlab version 2020a.

III.4. Modélisation et simulation du convertisseur boost

III.4.a. Schéma du hacheur boost

La figure (III.8) représente le schéma bloc du hacheur Boost

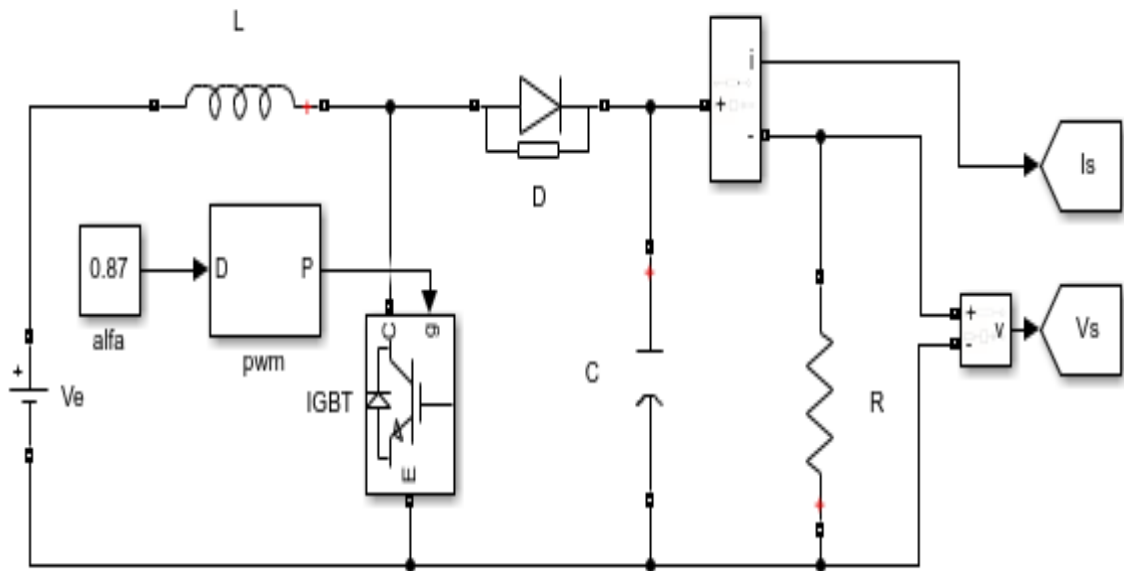


Figure III.8 : Schéma bloc du hacheur Boost

La figure (III.9) représente le signal de commande PWM

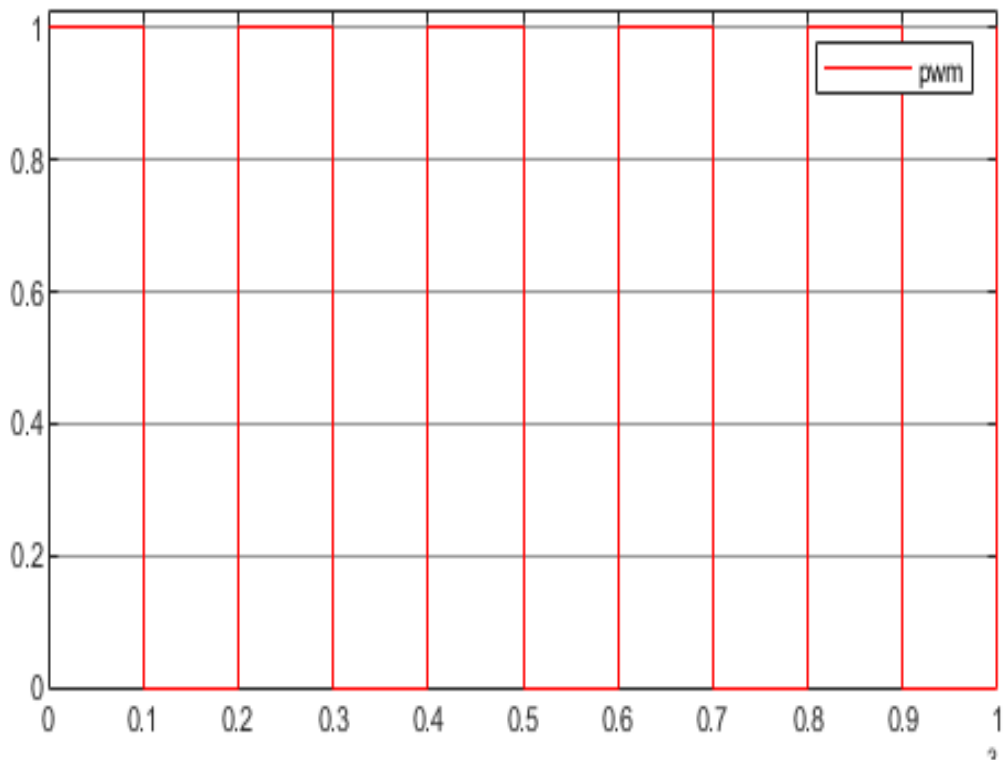


Figure III.9 : Signal de commande PWM

La figure (III.10) représente l'allure de tension et du courant pour $\alpha=0.5$

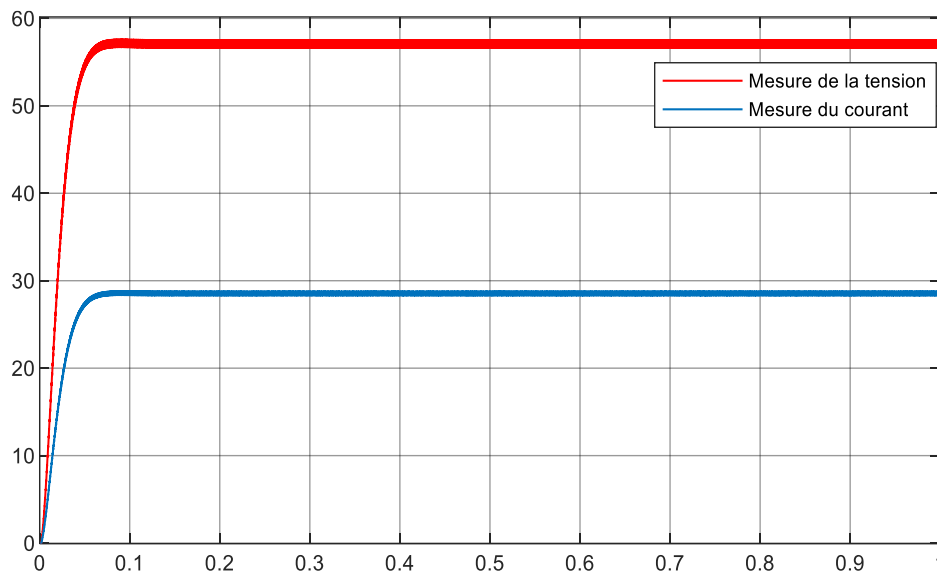


Figure III.10 : Allure de tension et du courant pour $\alpha=0.5$

La figure (III.11) représente l'allure de tension et du courant pour $\alpha=0.87$

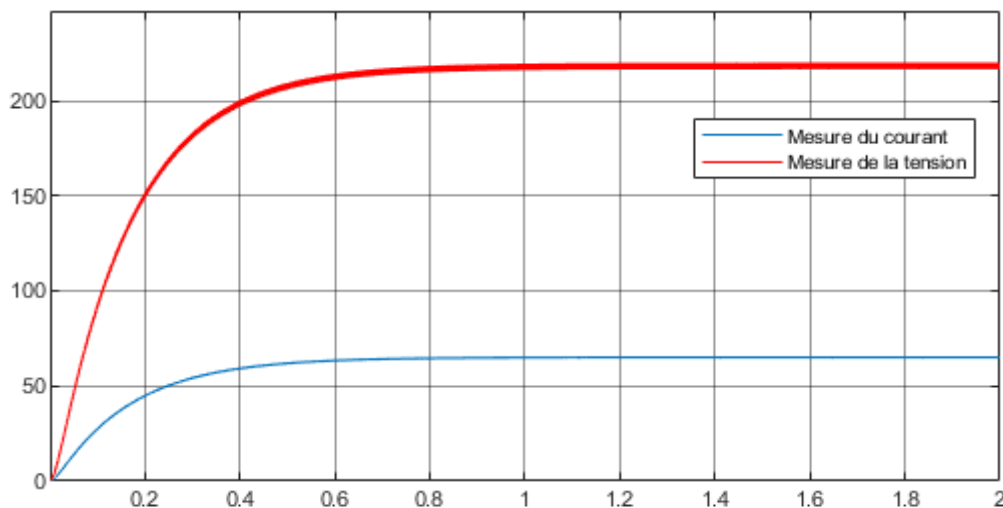


Figure III.11 : Allure de tension et du courant pour $\alpha=0.87$

III.4.b. Commande MPPT

Lorsque les panneaux solaires sont exposés à des conditions variables d'ensoleillement et de température, leur point de puissance maximale se déplace. L'utilité de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) P&O (Perturb and Observe) réside dans le fait qu'elle permet d'optimiser l'efficacité de conversion d'énergie des panneaux solaires. En maintenant les panneaux solaires à leur point de puissance maximale, elle permet d'extraire le maximum d'énergie solaire disponible, d'augmenter ainsi le rendement global du système. [28]

La figure (III.12) représente l'algorithme de la méthode de conduction incrémentale P&O.

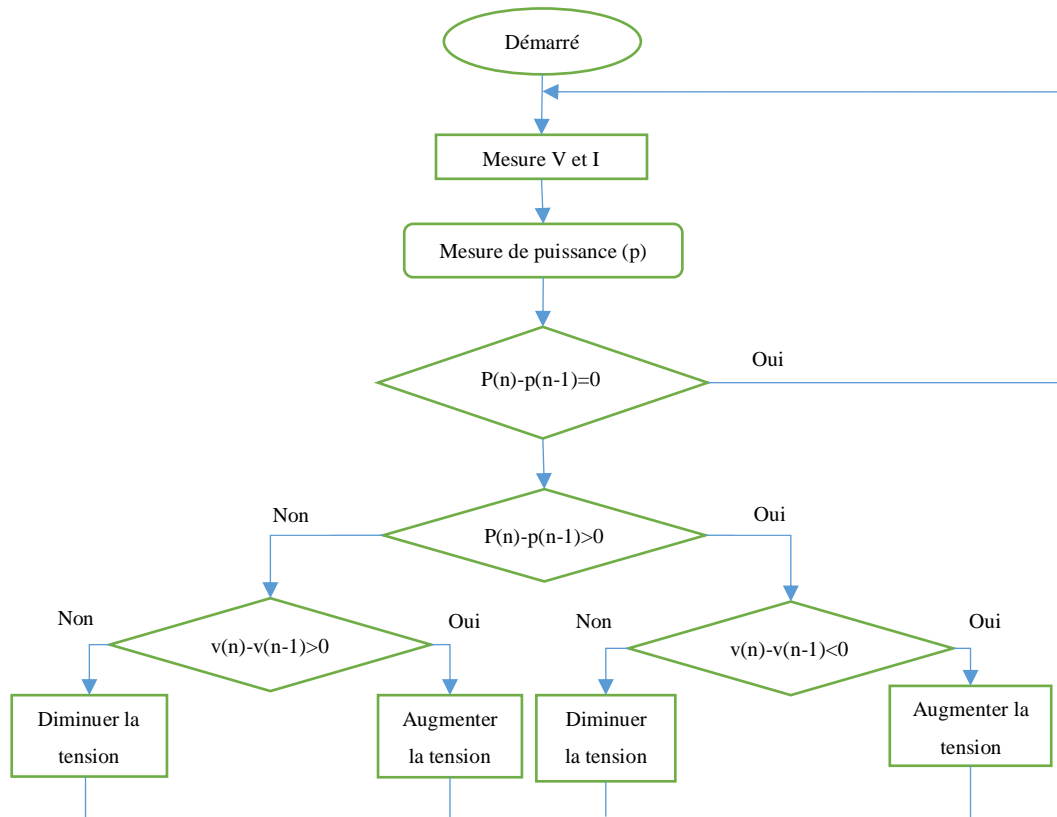


Figure III.12 : Algorithme de la méthode de conduction incrémentale P&O

III.5. Simulation du module photovoltaïque avec le hacheur boost

La figure (III.13) représente le schéma bloc global de la simulation.

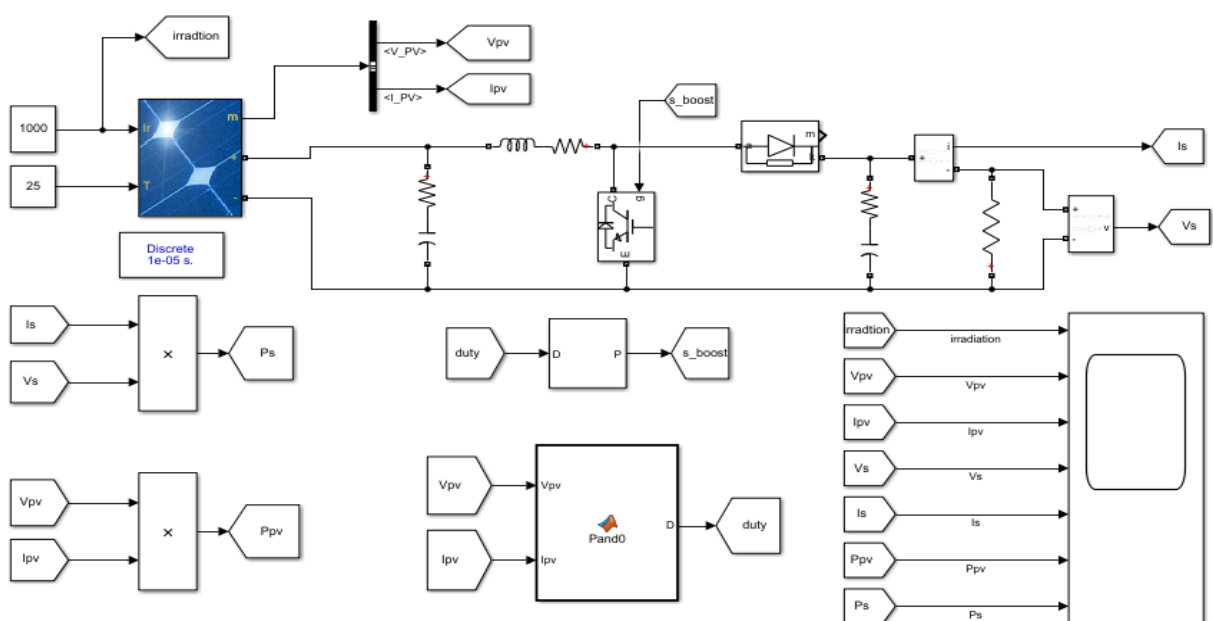


Figure III.13 : Schéma bloc de simulation photovoltaïque

III.5.a. Cas des conditions STC (Standard Test Conditions)

Dans les conditions standard les valeurs de l'ensoleillement et de la température sont constantes 1000W et 25°C respectivement.

Le résultat de la simulation du hacheur boost avec le module photovoltaïque sous les conditions STC (Standard Test Conditions) sont représenté dans la figure (III.14) suivante.

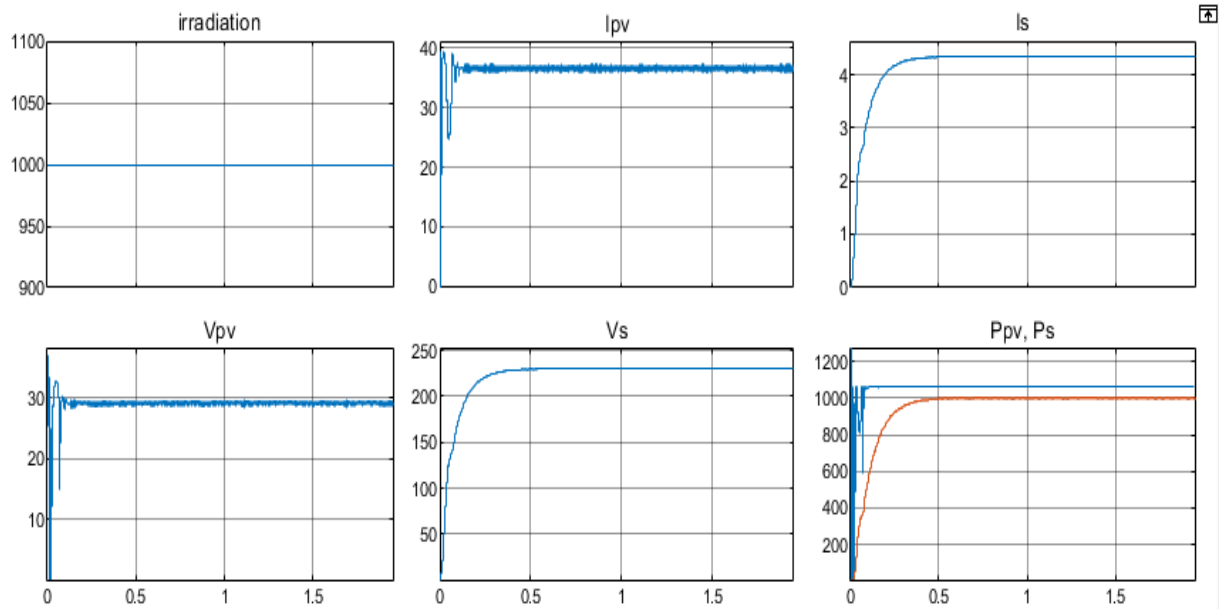


Figure III.14 : Allures des différents signaux d'entrée et de sortie du hacheur

Afin de visualiser les variations de tension et courant un zoom a été effectué, comme la montre la figure (III.15) suivante.

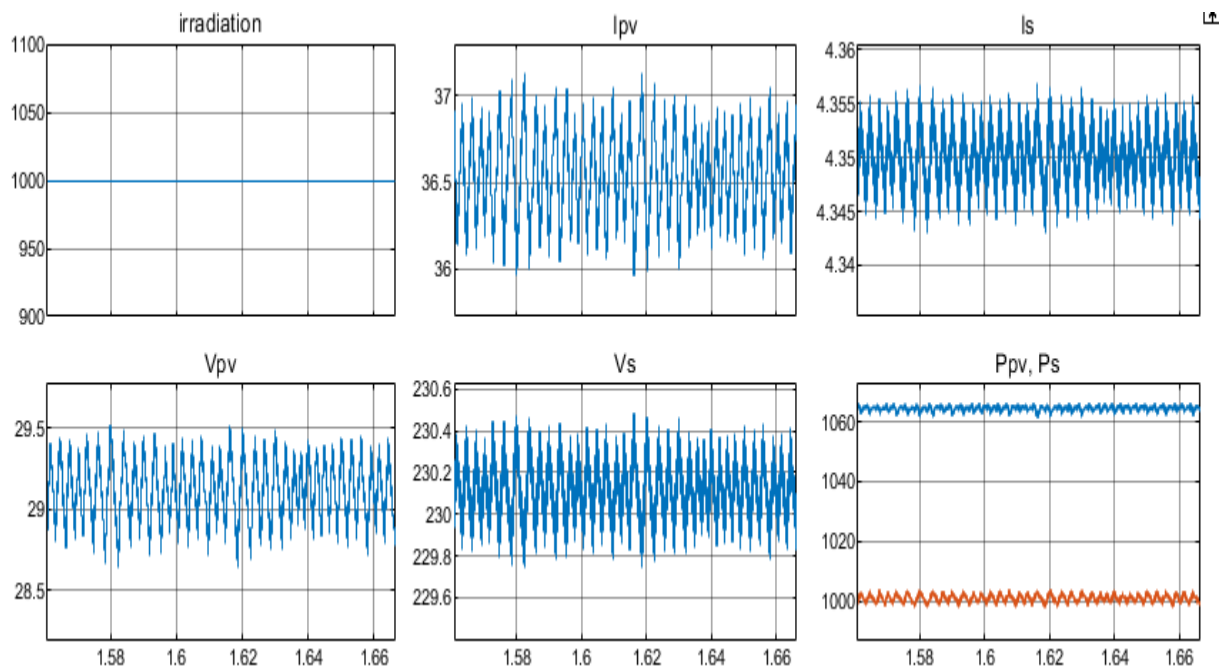


Figure III.15 : Allures des différents signaux d'entrée et de sortie du hacheur

Les variations de tension (ΔV) et de courant (ΔI) pour les différentes valeurs de α obtenues lors de la simulation sont présentées dans le tableau (III.3).

α	ΔI [A]	ΔV [V]
0.5	0.9	4
0.71	0.12	1.2
0.77	0.06	1
0.87	0.005	0.6

Tableau III.3 : Les variations de tension et courant pour différente valeur de α

Le rendement d'un convertisseur Boost peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_s}{P_{pv}} \times 100 = \frac{1000}{1065} \times 100 = 94\%$$

III.5.b. Cas des conditions variables

Lorsque l'ensoleillement et la température varie, la tension de sortie du module photovoltaïque également change. Le contrôleur MPPT surveille ces variations et ajuste le rapport cyclique du convertisseur Boost pour maintenir la tension de sortie du module au point de puissance maximale (MPPT). Le résultat de la simulation du hacheur boost avec le module photovoltaïque est représenté dans la figure (III 12) suivante.

La figure (III.16) représente les principaux signaux de puissance pour une perturbation d'ensoleillement.

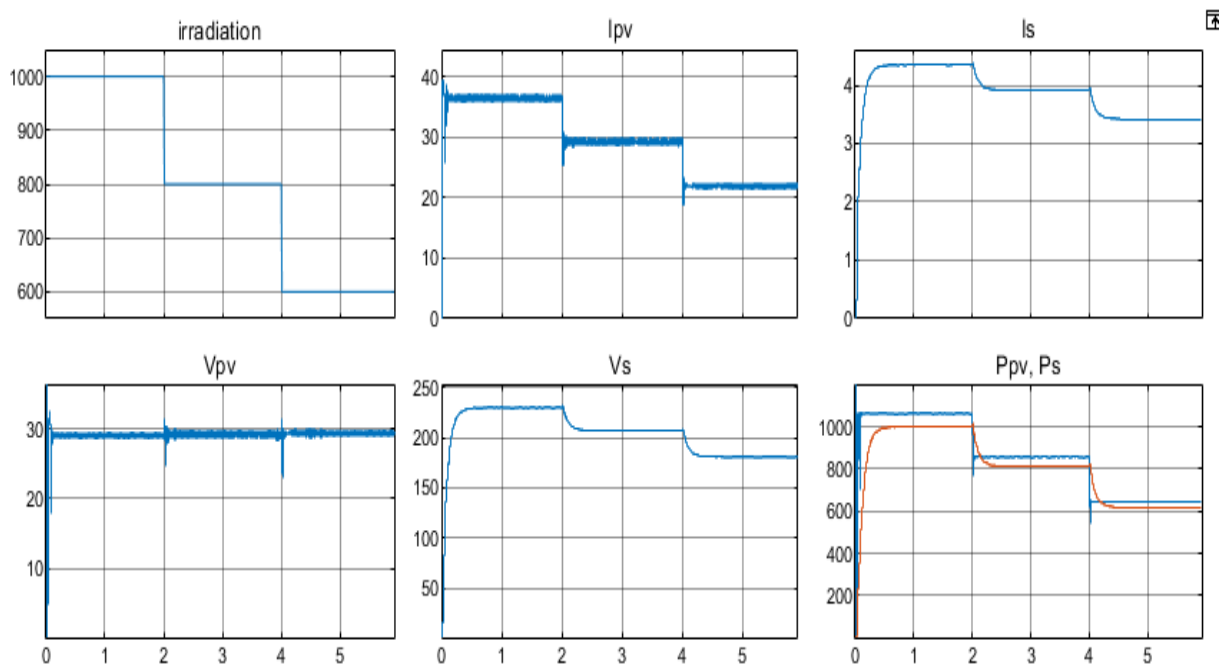


Figure III.16 : Les principaux signaux de puissance pour une perturbation d'ensoleillement.

La figure (III.17) représente les principaux signaux de puissance pour une perturbation de température.

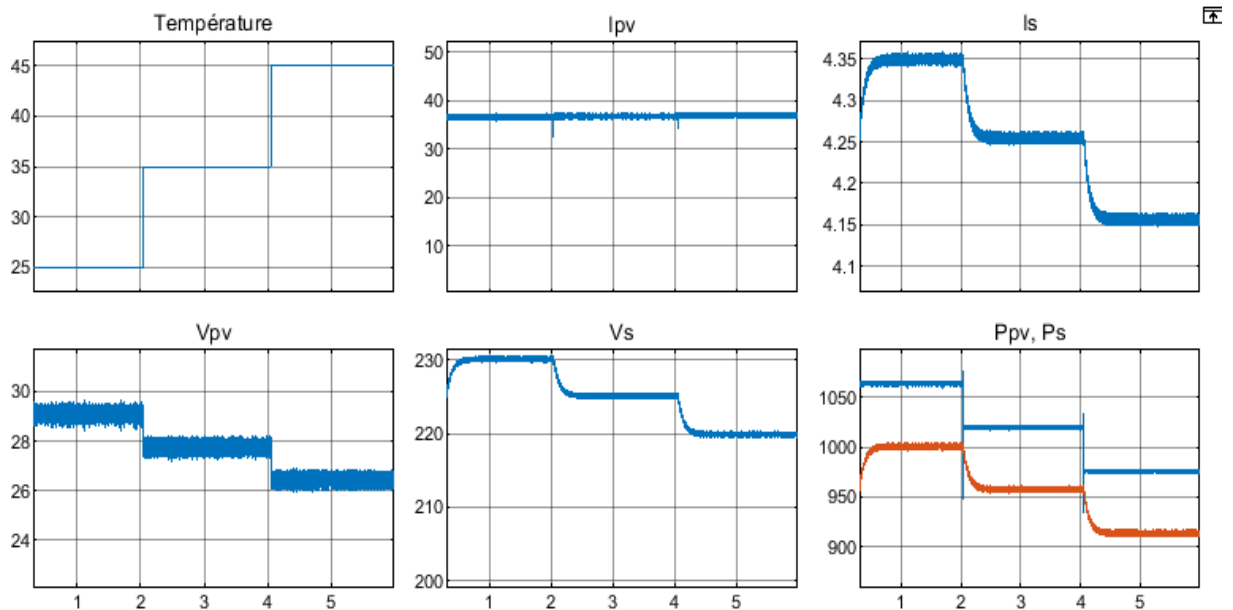


Figure III.17 : Les principaux signaux de puissance pour une perturbation de température.

III.6. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats de la simulation a révélé une concordance remarquable avec les résultats obtenus par calcul.

La tension de sortie du convertisseur Boost peut être ajustée sur une plage de valeurs allant de 58V jusqu'à la valeur souhaitée en contrôlant le rapport cyclique. Cette caractéristique offre une flexibilité précieuse pour adapter la tension de sortie aux exigences spécifiques d'un système.

La simulation confirme la flexibilité du convertisseur Boost en termes de réglage de la tension de sortie. Cependant, elle souligne également l'importance cruciale de choisir avec précision les valeurs des composants passifs pour optimiser les performances du système.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a débuté par une étude approfondie du comportement d'un panneau photovoltaïque associé à un convertisseur Boost, où les caractéristiques et les fonctionnalités du convertisseur ont été spécifiées en détail. Une simulation a ensuite été réalisée en utilisant une commande MPPT pour évaluer les performances du système.

Cette étude approfondie a confirmé l'efficacité de l'association d'un panneau photovoltaïque avec un convertisseur Boost et une commande MPPT. Elle a démontré que cette

approche permet d'exploiter pleinement le potentiel énergétique du panneau solaire en adaptant la tension de sortie et en suivant le point de puissance maximale en fonction des variations d'ensoleillement. Ces résultats renforcent la pertinence de cette configuration pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire joue un rôle essentiel dans la transition vers un système énergétique durable et respectueux de l'environnement. Son potentiel énorme, sa disponibilité mondiale et ses nombreux avantages en font une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques croissants de manière propre et renouvelable. En investissant dans la recherche, l'innovation et le déploiement de technologies solaires, nous pouvons construire un avenir énergétique plus durable pour les générations à venir.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons réalisé une modélisation détaillée d'un générateur photovoltaïque et étudié son comportement en fonction des variations climatiques, en particulier les caractéristiques de puissance-tension et courant-tension. En utilisant les résultats de la simulation, nous avons dimensionné avec précision les composants passifs du convertisseur Boost. Ce dimensionnement précis a permis d'optimiser les performances du système, d'améliorer son efficacité énergétique et d'assurer un fonctionnement stable et fiable du convertisseur.

Nous avons également évalué l'efficacité et les performances de la méthode de perturbation et observation (P&O) dans un système photovoltaïque. Cette méthode vise à maintenir en permanence la production maximale de puissance, ce qui contribue à améliorer le rendement global du système.

En conclusion, ce mémoire a approfondi notre compréhension du comportement des générateurs photovoltaïques associés à des convertisseurs Boost et à des techniques de commande MPPT. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives pour une utilisation plus efficace de l'énergie solaire, rapprochant ainsi notre société d'un avenir énergétique durable et respectueux de l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] M. Bidi, “Conception d’une centrale photovoltaïque pour recharge de voiture”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme Master, université de M’sila, 2019.
- [2] N. Zidane, “Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d’Energies Renouvelables”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Magister, université de Setif1, 2014.
- [3] K. Achari and N. Amadou, “Production d’énergie électrique à partir d’un système photovoltaïque”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Guelma, 2019.
- [4] M. BENHIDA, “Etude d’un system hybride turbine à gaz générateur éolien connecté au réseau électrique d’Adrar”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Adrar, 2017.
- [5] L. Hassaine and N. Benamrouche, “Etude d’un système photovoltaïque connecté au réseau”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Tizi-Ouzou, 2008.
- [6] N. Gasmi, “Les ressources en énergies renouvelables”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [7] I. ABBAD, “Simulation de l’effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d’une cellule solaire”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Oum El Bouaghi, 2019.
- [8] B. Boukhezzar, “Sur les stratégies de commande pour l’ optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable”, Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud, 2006.
- [9] H. Habi and Y. Bibi, “Simulation et Optimisation des performances d’un système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d’électricité”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, université de Bouira, 2016.
- [10] A. Bouchaker and M. Benbrinis, “Structure et Commande d’une installation photovoltaïque en site isolé” , Mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [11] M. Mekki, “Récupération des déperditions d’énergie dans les complexes industriels et

Références bibliographiques

- leur conversion en énergie électrique exploitable”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat, université d’Annaba, 2014.
- [12] A. Azizi, “Modélisation et optimisation d’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat, université d’Annaba, 2019.
- [13] S. Belakehal, “Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables”, thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [14] K. Ouabdelkader and H. Mersel, “Modélisation et Contrôle d’un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau” , mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [15] B. Zerguine, “Modélisation d'un Système de Production Electrique Par la Cellule Photovoltaïque”, Mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Magister, université d’Annaba, 2010.
- [16] A. Labouret and M. Viloz, “Energie solaire photovoltaïque”, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [17] M. Merad, “Injection de l’électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2010.
- [18] F. Slama, “Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [19] O. Benseddik and F. Djaloud, “Etude et optimisation d’un système photovoltaïque”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [20] H. Guedaouria, “Dimensionnement d’un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l’université de Béchar”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [21] B. Tebboub, “Etude conceptuelle des systèmes photovoltaïques à double et triple jonction”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

Références bibliographiques

- [22] A. Ricaud, “Systèmes photovoltaïques”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Master, Ecole d’ingénieurs Polytech ‘Savoie, 2011.
- [23] M. Alayat and I. Boucetta, “Maximisation de la production d’un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [24] A. Abid and Y. Bechlaghem, “Etude et dimensionnement d’un convertisseur SEPIC pour une application Photovoltaïque”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen, 2017.
- [25] S. Abada, “Etude et Optimisation d’un Générateur Photovoltaïque Pour La Recharge D ’ Une Batterie Avec Un Convertisseur SEPIC”, mémoire pour l’obtention du grade de Maître en Sciences, Université Laval Quebec, 2011.
- [26] Y. Bendris and F. Belahbib, “Etude comparative des différentes architectures de convertisseurs statiques dédiés au photovoltaïque”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme de Master, Université de Bejaia, 2013.
- [27] A. Belkaid, “Conception et implémentation d ’ une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat, Université de Setif1, 2015.
- [28] S. FERDJANI and O. MAATALLAH, “Etude et Réalisation d’un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d’Implémenter des Commandes MPPT”, mémoire de fin d’étude en vue de l’obtention du Diplôme de Master, Université de Adrar, 2019.
- [29] M. Amarouyache, “Contribution à l’optimisation d’une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque”, thèse en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat, Université de Constantine1, 2014.
- [30] H. Boukli, “conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique”, mémoire en vue de l’obtention du diplôme de Magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [31] S. E. Naffouti, “Dimensionnement et commande d’un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque”, mémoire de projet de fin d’étude en vue de l’obtention du Diplôme national d’ingénieur, Université de Monastir, Tunis, 2012.

Références bibliographiques
